

Heikki Jussila

Ilmatiiveys ja vuotokohdat pientaloissa

Diplomityö, joka on jätetty tarkistettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Helsinki 31.3.2015

Valvoja: Professori Risto Kosonen

Ohjaaja: Diplomi-insinööri Aarne Jussila

Tekijä Heikki Jussila		
Työn nimi Ilmatiiveys ja vuotokohdat pientaloissa		
Koulutusohjelma Energia- ja LVI-tekniikka		
Pääaine LVI-tekniikka		Koodi K3008
Työn valvoja Professori Risto Kosonen		
Työn ohjaaja Diplomi-insinööri Aarne Jussila		
Päivämäärä 31.3.2015	Sivumäärä 79	Kieli suomi

Tiivistelmä

Rakennuksen ilmapuotokohdat voivat aiheuttaa energiankulutusta, kosteuden tiivistymistä rakenteisiin, vetoisuutta sekä pölyn, mikrobien ja radonin pääsyä sisäilmaan. Ilmatiiveys mitataan painekoemenetelmällä ja vuotokohtia voidaan paikantaa lämpökameralla, käsin tunnustelulla, ilmapuotusmittauksilla, merkkisavukokeilla, merkkiainetutkimuksella tai akustisilla menetelmillä.

Tässä diplomityössä käsiteltiin laajaa uutta kokeellista aineistoa, joka perustuu 898 uudispientaloasunnon tiiveysmittaukseen vuosilta 2012–2015. Lisäksi aiemmista tutkimuksista koottiin 170 olemassa olevan uudispientalon otos vertailua varten. Tuloksena saatiin uudispientalojen ilmanvuotoluvun q_{50} keskiarvoksi $1,4 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$. Vastaavasti selvitettiin olemassa olevien pientalojen ilmanvuotoluvun keskiarvon olevan $3,7 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$. Tuloksena havaittiin myös, että ilmanvuotolukuun vaikuttavat muun muassa ulkoseinärakenne, rakennuksen tyyppi ja kerrosluku.

Vuotokohtien osalta tutkittujen uudispientaloasuntojen otos oli 372 kappaletta. Vuotokohdille kehitettiin uusi luokittelumenetelmä, jossa ne luokitellaan vuototyypin (82 tyyppiä) ja arvioidun suuruuden (neljä suuruusluokkaa) mukaan. Vuotoja havaittiin keskimäärin uudessa pientaloasunnossa 11,2 kappaletta (0,3 suurta, 1,6 kohtalaista ja 9,3 pientä vuotoa). Merkittävimmiksi vuotokategorioiksi saatiin ovet, sähköasennukset ja yläpohja. Uudesta tiedosta on hyötyä käytännön suunnitteluun ja tuotekehitykseen.

Vuotokohtien laskennallinen vaikutus energiankulutukseen on olemassa olevissa pientaloasunnoissa keskimäärin 2660 kWh ja uusissa pientaloasunnoissa 1010 kWh vuodessa. Löydettyjen vuotokohtien laskennallinen vaikutus on vuosittain 159–587 kWh lämmitysenergiankulutukseen uudessa pientaloasunnossa.

Avainsanat ilmatiiveys, tiiveysmittaus, ilmapuotokohtien paikannus, ilmanvuotoluku, vuotokohtien luokittelu

Author Heikki Jussila		
Title of thesis Air permeability and leakages in small residential buildings		
Degree programme Energy and HVAC-Technology		
Major HVAC-Technology		Code K3008
Thesis supervisor Professor Risto Kosonen		
Thesis advisor Aarne Jussila, M.Sc. (Tech.)		
Date 31.3.2015	Number of pages 79	Language Finnish

Abstract

Air leakages in buildings can cause energy expenditure, moisture condensation in structures, draft and also dust, microbes and radon entering the indoor air. Air permeability of a building is measured by fan pressurization method and leakages can be located by thermal imaging, probing by hand, air flow measurements, smoke testing, tracer-gas method or acoustic methods.

A new and comprehensive empirical research material is analyzed in this master's thesis. The empirical material is based on 898 air permeability tests in new small residential building apartments during 2012–2015 in Finland. A sample of 170 existing buildings was compiled from earlier studies for comparison. As a result, the air permeability q_{50} was found on average to be $1.4 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ in new small residential buildings. For existing small residential buildings, the air permeability q_{50} was examined to be $3.7 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ on average. Detached homes, semi-detached homes, row houses or summer cottages are meant by small residential buildings. It was also found that exterior wall type, building type and number of storeys have an effect on air permeability.

For air leakages, the studied sample was 372 new buildings. A new classification method was developed, where air leakages are classified based on leakage type (82 types) and size (four sizes). On average 11.2 leakages (0.3 large, 1.6 moderate and 9.3 small leakages) were found in new small residential building apartments. The most important leakage categories were found to be doors, electrical installations and ceiling. This new information is useful for practical planning and product development.

The calculatory average energy consumption annually due to air leakages is 2660 kWh in existing and 1010 kWh in new small residential building apartments. Detected leakages cause a calculatory energy consumption of 159–587 kWh annually in new apartments.

Keywords air tightness testing, air leakage, air permeability, leakage classification

Sisällysluettelo

1.	Johdanto	1
2.	Ilmatiivis rakentaminen	3
2.1.	Muuttuva rakentaminen ja rakennusfysiikka	3
2.2.	Ilmatiiveyden merkitys nykyaikaisessa rakentamisessa	5
2.3.	Ilmatiiviit rakenteet	11
2.4.	Lainsäädäntö ja ohjeet	17
2.4.1.	Ilmanvuotoluvun ilmoitusmenettely	19
2.5.	Ilmatiiveysmittausten merkitys tuotannossa	20
3.	Mittausmenetelmät	21
3.1.	Ilmatiiveysmittaus	21
3.2.	Ilmavuotokohtien paikannus	26
3.2.1.	Lämpökamerakuvaus	28
3.2.2.	Käsin tunnustelu	31
3.2.3.	Ilmavirtausmittaus	32
3.2.4.	Merkkisavukoe	33
3.2.5.	Merkkiainetutkimus	34
3.2.6.	Akustiset menetelmät	34
4.	Ilmatiiveyden mittaustuloksia	36
4.1.	Olemassa olevat pientalot	36
4.2.	Uudispientalot	37
5.	Ilmavuotokohtien paikannuksen kehitys ja mittaustuloksia	44
5.1.	Vuotokohtien suuruusluokitus	44
5.2.	Vuotojen tyyppiluokitus	47
5.3.	Mittaustuloksia uudesta ilmavuotokohtatutkimuksesta	51
6.	Pohdinta	67
7.	Yhteenveto	75
	Lähdeluettelo	77

1. Johdanto

EU:n energiatehokkuusdirektiivin mukaan kaikkien uusien rakennusten tulee olla lähes nollaenergiarakennuksia vuoden 2020 loppuun mennessä ja julkisten rakennusten jo kaksi vuotta aiemmin. Tätä kohti mentäessä rakennusten ilmatiiveyden merkitys korostuu entisestään. Tiukentuneiden vaatimusten myötä rakennuskokonaisuudesta tulee monimutkaisempi ja yksittäisten osakokonaisuuksien, kuten rakennusvaipan ilmatiiveyden toimivuus on entistä kriittisempää.

Ilmavuotokohdat aiheuttavat entistä helpommin kosteuden tiivistymistä rakenteisiin, koska eristepaksuudet ovat kasvaneet. Lisäksi rakennuksen ilmanvaihto ei toimi halutulla tavalla, mikäli rakenteet vuotavat. Toisaalta tiivis talo tarvitsee jatkuvan ja hyvin toimivan ilmanvaihdon (Saari, 2014). Edes hyvä ilmanvuotoluku ei välttämättä riitä, vaan yksittäiset vuotokohdat tulisi saada korjattua ennen rakennuksen valmistumista. Erinomaisessa talossa hyvän ilmanvuotoluvun lisäksi ilmavuotokohdat jakautuvat tasaisesti, eikä siinä ole yksittäisiä merkittäviä vuotokohtia.

Tämän diplomityön tutkimuskysymykset ovat:

1. Miten ilmatiiveys ja -vuotokohdat voidaan todentaa?
2. Mikä on ilmatiiveyden taso nykyään?
3. Mitä ilmavuotokohtia uusissa pientaloissa on?
4. Mitä ilmavuotokohdat tarkoittavat lämmitysenergian kulutuksena ja kustannuksina, ja mitä muuta ne voivat aiheuttaa?

Ilmatiiveydestä on tehty useita tutkimuksia viime vuosikymmenten aikana. Työn tavoitteena on tutkia uusien mittausten pohjalta ilmatiiveyden tilannetta nykyään sekä verrata tuloksia aiempiin tutkimuksiin. Työssä keskitytään erityisesti pientaloihin. Aiemmissa tutkimuksissa ilmavuotojen syitä ei ole selvitetty kovinkaan tarkasti. Tämän takia tavoitteena on myös kehittää ilmavuotokohtien paikannusmenetelmää, jotta voidaan paremmin vastata kysymyksiin mistä ja miksi rakennusvaippa vuotaa.

Vuotokohtien tarkempi tuntemus auttaa suunnittelijoita, talotehtaita, rakennusliikkeitä ja rakentajia parantamaan omien kohteidensa ilmatiiveyttä. Tiedosta on hyötyä myös rakennustuoteteollisuudelle ja palvelutuottajille, kuten ovien, eristeiden, ilmanvaihtolaitteiden tai piippujen valmistajille ja asentajille. Korjausrakentamisessa vuotokohtien parempi tuntemus ja paikannus helpottavat niiden korjaussuunnittelussa ja korjausten toteutuksessa. Asukkaat saavat lopulta toimivampia ja energiatehokkaampia asuntoja, ja saavutetaan asetetut energiatehokkuus-, ilmasto- ja sisäilmatavoitteet.

2. Ilmatiivis rakentaminen

2.1. Muuttuva rakentaminen ja rakennusfysiikka

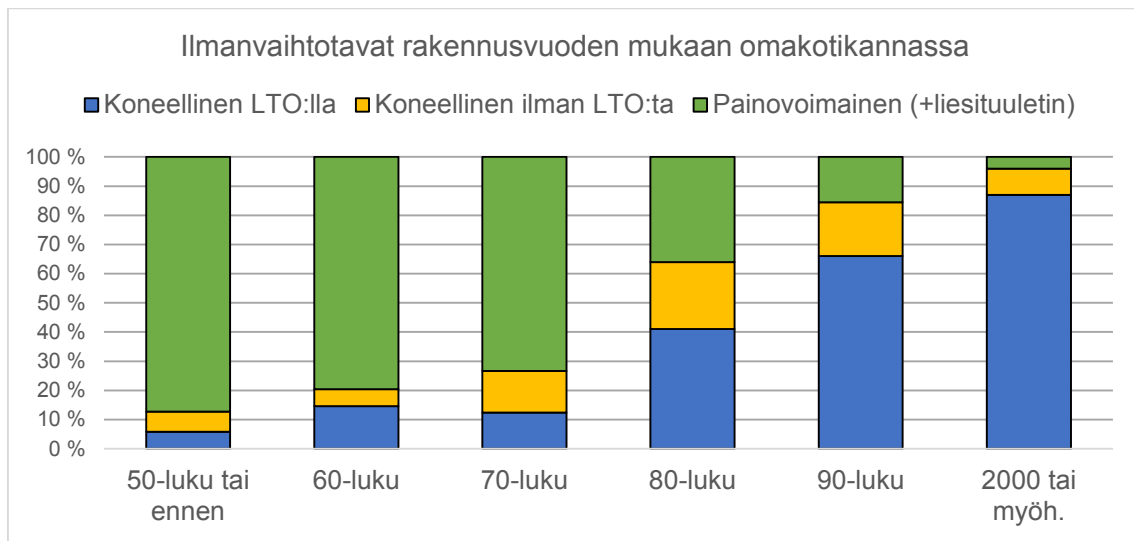
Rakennuksen painesuhteisiin vaikuttaa eniten savupiippuilmiö, tuuli ja koneellinen ilmanvaihto. Savupiippuilmiö syntyy lämpimän ilman noustessa ylöspäin. Mitä suurempi lämpötilaero on sisä- ja ulkoilman välillä, sitä suurempi on savupiippuilmiön aiheuttama paine-ero. Savupiippuilmiön vaikutuksesta etenkin yläpohja ja muut korkealla olevat rakenteet jäävät ylipaineisiksi ilman koneellista ilmanvaihtoa. Usein tosin myös koneellisella ilmanvaihdolla rakennuksen yläosat jäävät lievästi ylipaineisiksi. Tämä korostuu korkeissa rakennuksissa. Tuulen vaikutus aiheuttaa tuulen tulosuunnalle ylipainetta ja vastakkaiselle puolelle alipainetta. Ilmanvaihto aiheuttaa yleensä tarkoituksenmukaisesti alipainetta (Paloniitty, 2012) (Saari, 2014).

Talot suunnitellaan lievästi alipaineisiksi etenkin kosteusteknisistä syistä. Suomen ilmastossa ulkoilma on suurimman osan vuodesta kylmempää kuin sisäilma. Sisäilma taas on lähes poikkeuksetta kosteampaa (absoluuttisesti) kuin ulkoilma, koska sisäilmaan syntyy kosteuslisä asukkaista itsestään ja heidän toiminnoistaan (esimerkiksi hikoilu, hengitys, suihkussa käynti, pyykinpesu, ruoanlaitto). Ilman kylmetessä myös sen kyky sitoa kosteutta heikkenee, minkä takia kylmetessään niin sanottuun kastepisteeseen alkaa kosteus tiivistyä materiaalipinnoille. Alipaineisuus siis estää kostean ja lämpimän sisäilman virtausta rakenteisiin ja kosteuden tiivistymistä sinne. Alipaineen olisi hyvä olla mahdollisimman pieni, sillä paine-ero aiheuttaa ilman liikettä rakenteissa ja muun muassa ylimääräistä energiankulutusta ja vetoisuutta. Paine-eroa ei suoranaisesti suunnitella, vaan poistoilmavirta suunnitellaan tuloilmavirtaa suuremmaksi, mikä aiheuttaa alipaineisuuden. Tyypillisesti alipaineisuus on alle 10 pascalia (Paloniitty, 2012).

Rakenteen lämpötila putoaa merkittävästi lämmöneristekerroksessa, jolloin mahdollinen kosteus tiivistyy yleensä eristekerroksen ja sen jälkeisen rakenteen pintaan. Kerrokselliset rakenteet tulee suunnitella niin, että vesihöyryn vastus

pienenee sisältä ulospäin mentäessä. Kerroksellisissa rakenteissa tarvitaan aina vähintään ilmansulku, ja jopa höyrynsulku, joka tyypillisesti toimii samalla ilmansulkuna. Nämä voivat olla myös erillisiä. Ilmansulku onkin oltava eristekerroksen sisemmällä puolella, jotta sisäilman kosteus ei tiivistyisi siihen. Muuratuissa harkkorakenteissa ilmansulkuna toimii yleensä tasoitekerros ja puurakenteissa ilman- ja höyrynsulkukerroksena on yleensä höyrynsulkumuovi, höyrynsulkupaperi tai levymäinen materiaali, kuten polyuretaanilevy. Joskus eristekerros voi toimia myös samalla ilman- ja höyrynsulkuna (esimerkiksi EPS, XPS, polyuretaani, hirsi). Eristekerroksen jälkeen on etenkin puurunkoisissa taloissa yleensä tuuletusväli, josta kosteus pääsee haihtumaan. Kosteuden haihtuminen on kuitenkin rajallista, joten jos kosteutta pääsee kertymään rakenteeseen nopeammin, kuin sitä haihtuu, syntyy kosteusvaurio. Rakenteen ulko-osiin tulee väistämättä kosteutta myös ulkokautta, sillä ulkorakenteet altistuvat esimerkiksi sateelle ja ulkoilman lämpötilavaihteluiden aiheuttamalle kosteuden tiivistymiselle. (Aho, 2009)

Aiemmin talot suunniteltiin ja rakennettiin painovoimaisella ilmanvaihdolla. Painovoimainen ilmanvaihto perustuu siihen, että kylmä ulkoilma tulee alakautta sisään korvausilma-aukoista, ja lämmitessään talon sisällä nousee ja poistuu yläkautta poistoilmaventtiileistä. Painovoimainen ilmanvaihto toimii luonnollisesti talvella ulko- ja sisäilman lämpötilaeron ollessa suuri sekä tuulisella kelillä. Ongelmia aiheuttaakin etenkin lämmin ja tyyni kesäpäivä. Kylmällä talvikelillä ilmanvaihtuvuus voi olla liiankin tehokasta. Painesuhteet myös vaihtelevat merkittävästi painovoimaisella järjestelmällä, sillä talo on altis etenkin tuulen vaikutukselle. Tällöin osa rakennuksesta voi olla ylipaineinen pitkiäkin aikoja, mikä voi aiheuttaa kosteuden tiivistymisriskin rakenteisiin ilmapuotokohtien kautta. (Paloniitty, 2012)



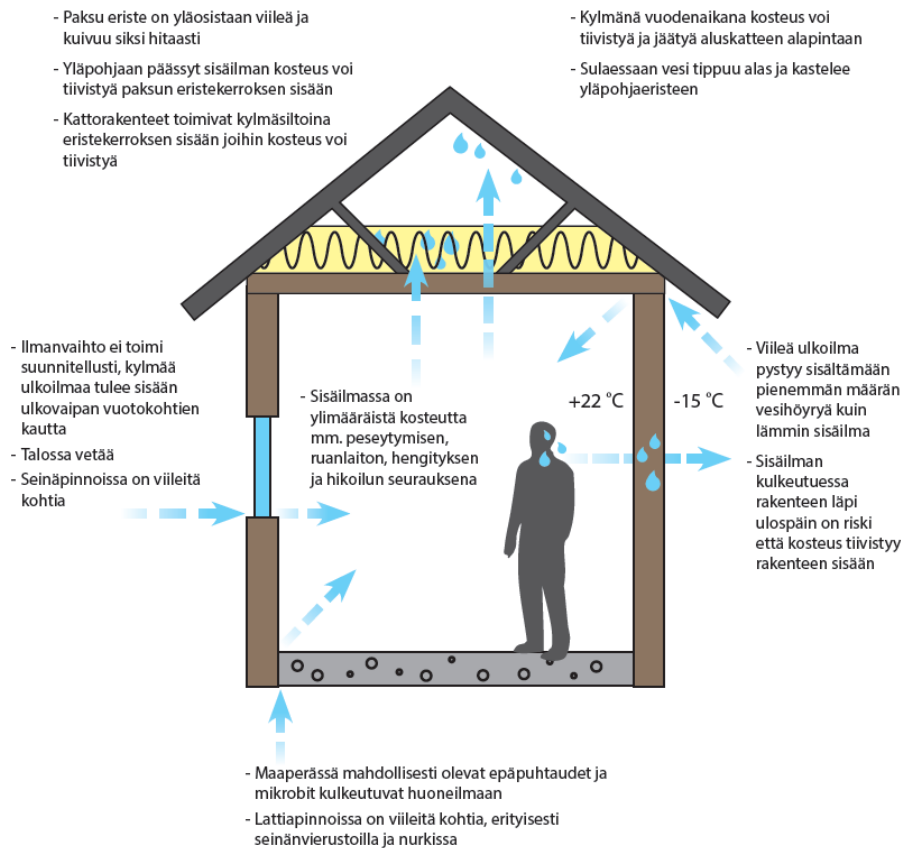
Kuva 1. Ilmanvaihtoratkaisut ja kehitys omakotikannassa. (Rakennustutkimus RTS Oy, 2012)

Koneelliseen ilmanvaihtoon siirryttiin etenkin 80-luvun jälkeen (kuva 1). Nykyään lähes kaikkiin uusiin taloihin asennetaan koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto lämmöntalteenotolla. Koneellisen tulo- ja poistoilmanvaihdon avulla riittävä ilmanvaihto voidaan toteuttaa olosuhteista riippumatta. Tuloilma saadaan suodatettua epäpuhtauksista ja poistoilmasta saadaan otettua osa lämmöstä talteen. Rakennus saadaan pidettyä halutusti pienessä alipaineessa ulkoilmaan nähden. Ilmanvaihto poistaa myös ylimääräisen kosteuden ja hiilidioksidin sisäilmasta. Riittävä ilmanvaihto takaa siis etenkin sen, että sisäilma on puhdasta ja rakenteet pysyvät kuivina ja terveinä. (Rakennustutkimus RTS Oy, 2012)

2.2. Ilmatiiveyden merkitys nykyaikaisessa rakentamisessa

Energian säästötavoitteet ovat lisääntyneet viime vuosikymmenien aikana energian hintojen nousun ja ilmastopoliittisten tavoitteiden johdosta. Aluksi ryhdyttiin parantamaan rakenteiden U-arvoja, eli kasvattamaan eristepaksuuksia. Tämän jälkeen alettiin kiinnittämään huomiota ilmatiiveyteen, ilmanvaihdon lämmöntalteenottoon ja muuhun talotekniikkaan. Kasvaneet eristepaksuudet aiheuttavat sen, että rakenteiden ulko-osat ovat kylmempiä kuin aiemmin, joten sisältä ulospäin kulkevat ilmavuodot aiheuttavat entistä helpommin kosteuden

tiivistymistä rakenteisiin (kuva 2). Vanhoissa taloissa pienistä eristepaksuuksista johtuen ilmapuodoilla oli siis kosteusteknisesti vähäisempi merkitys kuin nykyään.

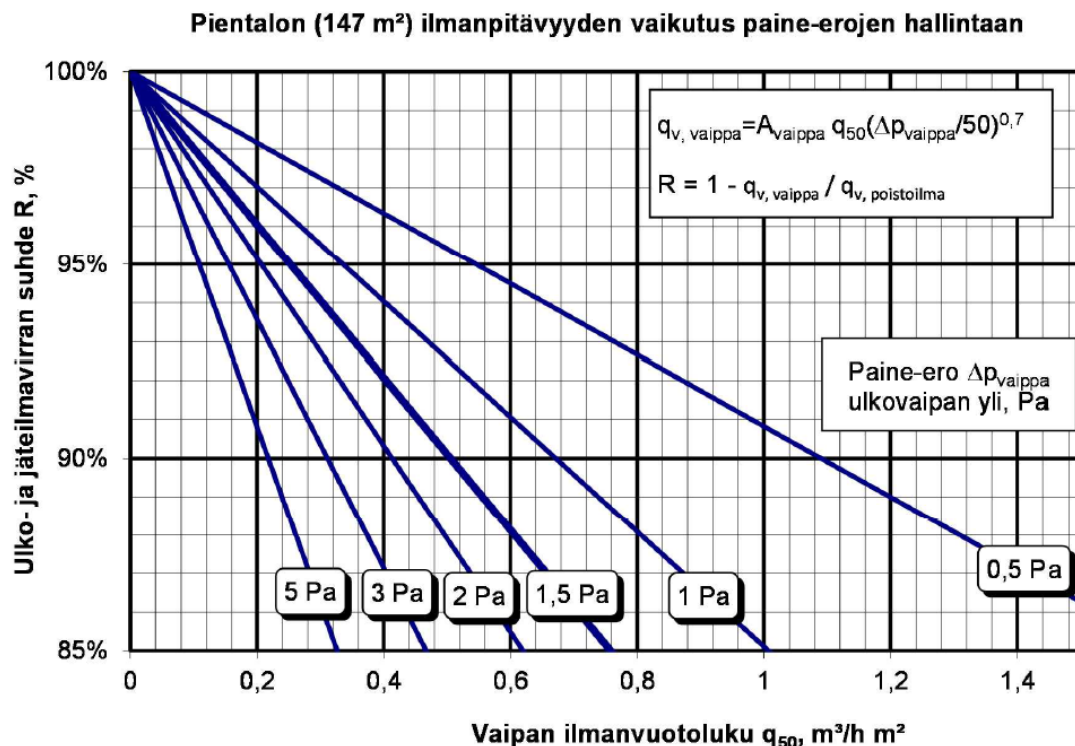


Kuva 2. Nykyaikainen talo, jonka ilmatiiveydessä on selviä puutteita.

Nykyaikainen tiivis talo ei toimi oikealla tavalla ilman koneellista ilmanvaihtoa. Koneellisen ilmanvaihdon pysäyttäminen tarkoittaisi, että ilma ei enää vaihtuisi riittävästi pelkkien vuotokohtien kautta. Sisäilman laatu heikkenisi merkittävästi ja rakenteisiin voisi lopulta alkaa kertymään kosteutta. Hyvä, terveellinen ja viihtyisä sisäilma saavutetaan ainoastaan riittävän ja toimivan ilmanvaihdon avulla. Koneellisen ilmanvaihdon onkin oltava tiiviissä talossa jatkuvasti päällä. (Saari, 2014)

Vastaavasti voidaan sanoa, että koneellinen ilmanvaihto ei toimi oikein, mikäli talo ei ole tiivis. Mikäli vuotokohtia on paljon, aiheuttaa koneellinen ilmanvaihto sen, että korvausilmaa imetään vuotokohtien kautta sisäilmaan. Asuinrakennukset suunnitellaan niin, että jäteilman määrä on hieman suurempi

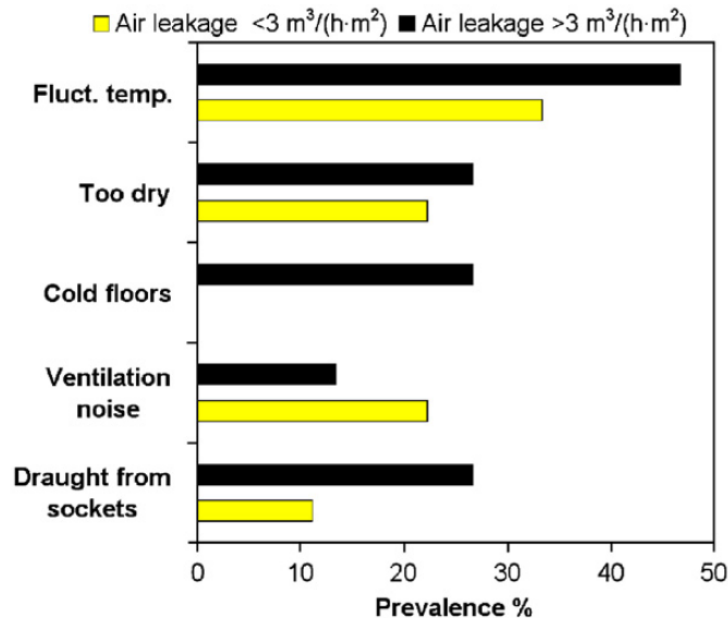
kuin ulkoilman määrä. Näiden erotus on käytännössä vuotoilmaa. Tämä aiheuttaa pienen ja halutun alipaineen rakennukseen. Hatarassa talossa käy niin, että joko riittävää alipainetta ei saavuteta tai vuotoilman määrä kasvaa merkittävän suureksi. Tiiviissä talossa riittävä alipaine saavutetaan pienemmällä vuotoilmamäärällä, eli jäteilmamäärän ja ulkoilmamäärän erotus voi olla pienempi. Esimerkiksi 147 m² kokoisessa talossa ulkoilmavirta voisi olla 50 l/s. Kuvan 3 mukaan vähemmän tiiviissä talossa (q₅₀ = 1,4 m³/m²h) poistoilmavirralla 57 l/s saavutettaisiin 0,5 Pa alipaine. Tiiviimmässä talossa (q₅₀ = 0,2 m³/m²h) sama alipaine saavutettaisiin jo 51 l/s poistoilmavirralla. (Ympäristöministeriö, 2011) (Saari, 2014)



Kuva 3. Tiiveyden vaikutus paine-erojen hallintaan ja ilmanvaihdon tasapainottamiseen (Saari, 2014)

Vuotoilman mukana sisäilmaan voi siirtyä ulkoa, maasta ja rakenteista muun muassa pölyä, radonia ja mikrobeja. Ulkoa tai asuntojen välillä voi kulkeutua vuotokohtien kautta myös hajuja (pakokaasut, tupakka, rasva) ja ääniä, jotka kulkeutuvat helposti ilmavuotokohtien kautta. Paloturvallisuuskin paranee, jos

vuotokohtia on mahdollisimman vähän, sillä tuli ja savukaasut leviävät helposti ilman mukana. (Aho, 2009)



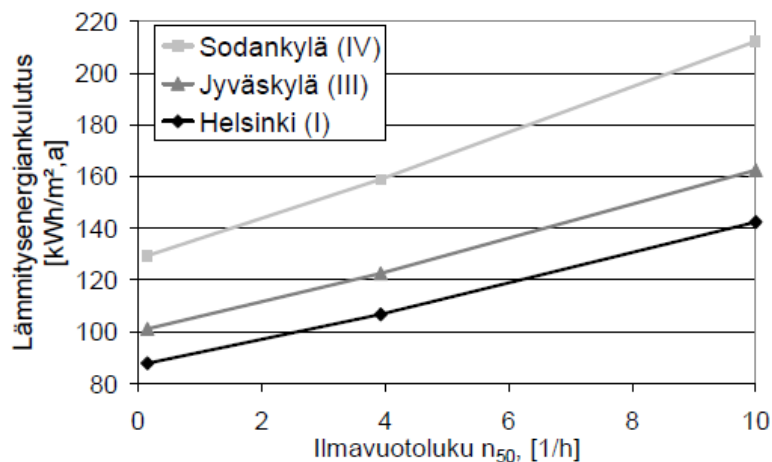
Kuva 4. Ilmanvuotoluvun vaikutuksia sisäilmastoon asukkaiden kokemana (n = 32)
(Kalamees, 2006)

Vuotokohdilla on myös suuri merkitys asumisviihtyvyyteen ja etenkin lämpöviihtyvyyteen (kuva 4). Epätiiviissä taloissa on koettu tiiviisiin taloihin nähden enemmän vaihtelevia lämpötilaolosuhteita, kuivuutta, kylmiä lattioita ja vetoisuutta pistokkeista. Toisaalta tiiviissä taloissa koettiin enemmän melua ilmanvaihdosta. (Kalamees, 2006) (Aho, 2009)

Yläpohjan tiiveys on erityisen tärkeää korkeissa rakennuksissa. Yläpohjan alipaineisuus on lähes mahdotonta ylläpitää pakkasilla edes koneellisen tulo- ja poistoilmanvaihdon avulla. Reiät ja muut epätiiveyskohdat yläpohjassa aiheuttavat siten ylipainetilanteessa kostean sisäilman kulkeutumisen yläpohjarakenteisiin, missä kosteus tiivistyy vedeksi kohdatessaan kylmän pinnan. Tästä voi aiheutua pahimmillaan merkittävä kosteusvaurio. (Saari, 2014)

Alapohjan tiiveys taas on erityisen tärkeää sieltä tulevien mikrobien ja radonin takia. Alhaalla rakennuksessa on savupiippuilmion takia yleensä luonnollisesti suurin alipaine. Alapohjan kosteat ja lämpimät olosuhteet ovat otollisia homeiden

ja mikrobien syntymiselle. Tärkeimpien keinojen joukossa sisäilman liian suurten radon- ja mikrobipitoisuuksien estämiselle on nimenomaan tiivis alapohja. (Säteilyturvakeskus STUK, 2014) (Aho, 2009)

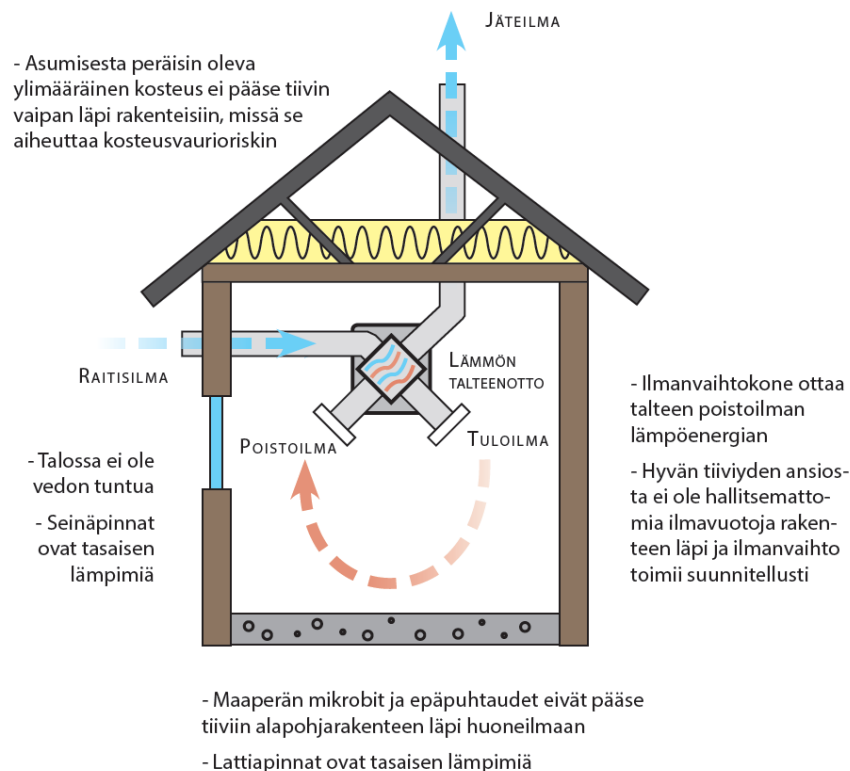


Kuva 5. Ilmatiiveyden vaikutus lämmitysenergiankulutukseen simulointitapauksessa eri ilmastovyöhykkeillä. (Vinha, 2009)

Hyvä ilmatiiveys parantaa rakennuksen energiatehokkuutta merkittävästi. Nykyaikaisessa talossa ilmanvaihdossa käytetään lämmöntalteenottoa. Vuotoilmavirtaukset sen sijaan eivät kulje lämmöntalteenoton kautta ja lisäävät siten energiankulutusta. Osa vaipan lämmönjohtumisen häviöistä kuitenkin palautuu vuotoilmavirran mukana rakennukseen (vaipan lämmöntalteenottoefekti). Simulointitapauksissa on osoitettu, että ilmanvuotoluvun n_{50} kasvaessa yhdellä yksiköllä, kasvaa lämmitysenergiankulutus noin 4-12 % ja siten kokonaisenergiankulutus noin 2-7 %. Simuloinnissa on huomioitu vaipan lämmöntalteenottoefekti. Kasvu on suurempaa, jos talo on tuulelta suojaton. Energiankulutus kasvoi simulointimalleissa lähes lineaarisesti ilmanvuotoluvun kasvaessa (kuva 5). Yksinkertaistaen voidaan sanoa, että yhden vuotoluvun lisäys kasvattaa lämmitysenergiankulutusta 7 % ja siten kokonaisenergiankulutusta 4 %. (Vinha, 2009) (Ympäristöministeriö, 2012)

Tiiviillä rakentamisella on myös haittapuolia. Jos ilmanvaihto on toteutettu tiiviissä talossa huonosti, tai jos käyttäjä tai sähkökatkos katkaisee ilmanvaihdon, ei ilma

vaihtu enää riittävästi. Tämän seurauksena voi syntyä mm. kosteusvaurioita tai epäterveellinen sisäilma. Tulisijan syttyminen voi olla ongelmallista, mikäli tulo- ja poistoilmanvaihto ei ole tasapainossa tai ei ole toimivaa korvausilmaratkaisua tulisijalle tai erillispoistoille (Saari, 2014). Alipaineisuus voi nousta myös merkittävän suureksi erillispoistoja, kuten liesituuletinta käyttäessä, mikä vaikeuttaa ovien ja ikkunoiden avaamista. Ilmanvaihdon tasapainottaminen on haastavampaa, sillä tulo- ja poistoilmavirran ero tulee säätää pienemmäksi.



Kuva 6. Nykyaikainen ilmatiivis talo.

Yhteenvetona voidaan todeta, että hyvä ilmatiiveys mahdollistaa ilmanvaihdon toimivuuden, ja siten toimivan ja terveen talon (kuva 6). Se pienentää lämmityksen energiankulutusta ja kesällä viilennystarvetta. Myös kosteusriski pienenee, sillä sisäilman kosteus ei pääse ilmanvuotokohdista tiivistymään rakenteisiin. Aukkaiden kokema vedon tunne vähenee etenkin lattiapinnoilla ja pölyt, mikrobit tai radon ei pääse rakenteista tai ulkopuolelta sisäilmaan. Lisäksi hajut, kuten tupakka tai pakokaasut, sekä äänet ulkoa tai toisista asunnoista vähenevät ja paloturvallisuus paranee. Hyvällä ilmatiiveydellä saadaan aikaan

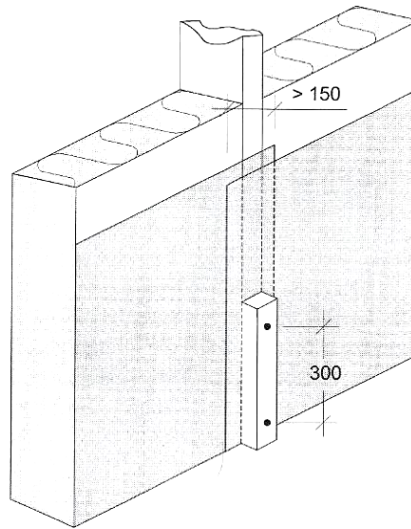
merkittäviä etuja liittyen asumisviihtyvyyteen, terveellisuuteen ja energiatehokkuuteen. (Saari, 2014) (Vinha, 2009) (Paloniitty, 2012) (Aho, 2009)

2.3. Ilmatiiviit rakenteet

Tässä kappaleessa esitetään peruseriaatteita ilmatiiviiden rakenteiden suunnittelemiseksi ja rakentamiseksi elinkaarikestäviksi. Lisäksi annetaan esimerkkejä ilmatiiviistä rakenneratkaisuista ja esitellään joitain tiivistämiseen tarkoitettuja erikoistuotteita, mitkä ovat nykyisellään jo hyvin yleisesti käytössä.

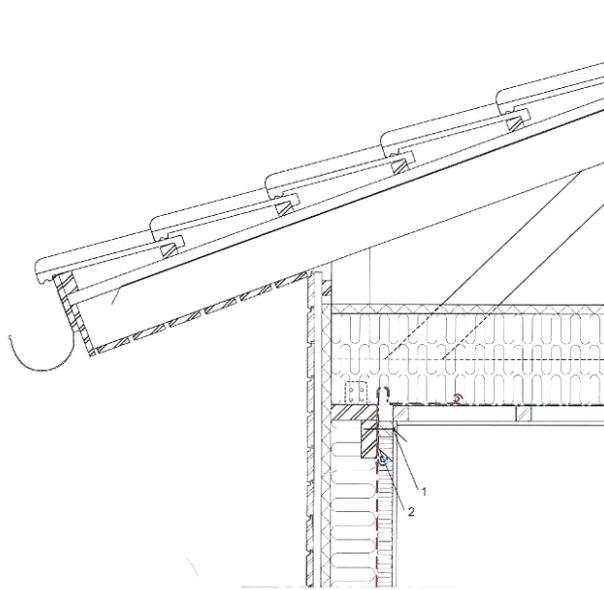
Peruseriaate on, että ilmansulkukerroksen tulisi jatkua yhtenäisenä koko rakennuksen vaipan ympäri. Haasteena tässä ei ole yleensä itse ilmansulku, vaan sen liitoskohdat ja läpiviennit sekä ilmansulun ehjänä pysyminen rakennusprojektin ja rakennuksen elinkaaren aikana. Lisähaastetta aiheuttavat kosteiden tilojen ja saunojen toteutus. Ilmatiiviiden rakenteiden toteuttamisessa oleellista on hyvä suunnittelu ja huolellisuus työtä tehdessä. (Aho, 2009)

Tiiviiden rakenteiden tulisi myös säilyttää ilmanpitävyytensä koko rakennuksen elinkaaren ajan. Rakenteet tulisi suunnitella siten, ettei merkittäviä muodonmuutoksia synny esimerkiksi lämpötila- tai kosteusvaihteluista. Mikäli tällaisia pieniä muutoksia kuitenkin syntyy, niin materiaalien tulisi kestää nämä muutokset. Esimerkiksi tiivistyksissä käytetyn teipin liimapinta tulisi kestää koko rakennuksen käyttöänsä irtoamatta. Tiivistysteipit ovatkin kehittyneet etenkin pitkäikäisyyden osalta. Nykyään käytetään paljon valmiita tiivistysratkaisuja, kuten ilmanvaihtoputkien läpivientien asennuslaippoja. (Aho, 2009)



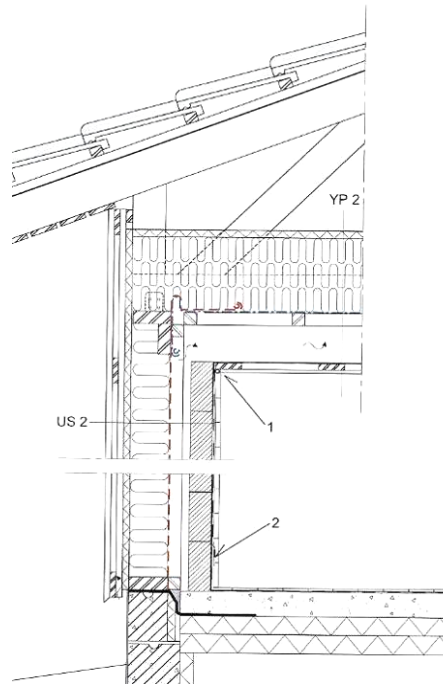
Kuva 7. Ilmansulkukalvon jatkaminen puurankarakenteisessa seinässä. (Aho, 2009)

Puurankarakenteisissa seinissä kalvomainen ilmansulku suositellaan sijoitettavaksi noin 50 mm sisäpinnan levyn taakse, jotta sähköasiat ja -johdot voidaan asentaa rikkomatta ilmansulkua. Kalvomainen ilmansulku kannattaa jatkekohdistaan limittää ja kiinnittää puristusliitoksella tai teipillä (kuva 7). Vaihtoehtona kalvomaiselle ilmansululle on esimerkiksi levymäiset ilmansulku- ja eristelevyt, kuten solumuovieristyslevy tai polyuretaanilevy. Levymäiset ilmansulut tulee vaahdottaa tai teipata saumoistaan kiinni toisiinsa. Harkkoseinissä ja puhtaaksimuuratuissa tiiliseinissä ilmansulku tehdään rappaamalla, tasoittamalla tai muulla pinnoitteella. Betonivalu- tai betonielementtiseinät ovat itsessään ilmanpitäviä, kunhan halkeilu estetään riittävän tiheällä raudoituksella. Hirsiseinissä hirsiväleissä tulee käyttää joustavaa saumaeristettä, kuten solumuovi- tai kumitiivisteitä. Hirsirakenteissa on otettava aina huomioon painuma, joka voi parantaa tiiveyttä vielä myöhemmin. Painumisen jälkeen tiiveyttä voidaan vielä parantaa uudestaan esimerkiksi polyuretaanivaahdolla. Hirsitaloissa erityisen tärkeää tiiveyden kannalta ovat seinien nurkkasalvokset. (Aho, 2009)



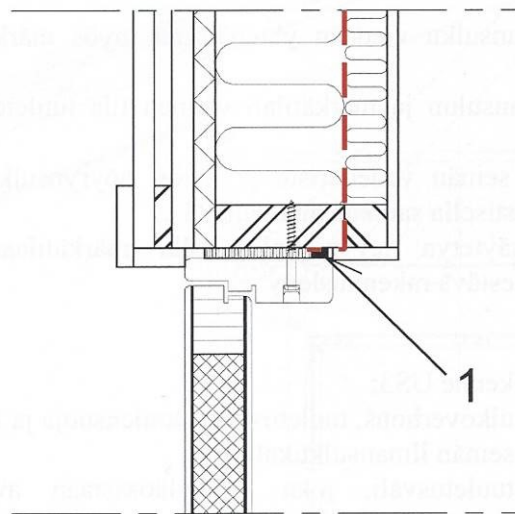
Kuva 8. Puurakenteisen yläpohjan ja ulkoseinän liitos kalvomaisella ilmansululla. (Aho, 2009)

Alapohjassa, yläpohjassa sekä alapohjan, yläpohjan ja välipohjan liitoksessa seinään tiivistysperiaatteet ovat samat kuin seinissäkin. Kalvomainen ilmansulku tulee limittää riittävästi ja kiinnittää puristusliitoksella tai teippaamalla. Esimerkiksi yläpohja-seinäliitoksessa yksi tapa toteuttaa tiivis liitos on esitetty kuvassa 8. Kuvassa liitos puristetaan tiiviiksi rimalla ja ruuvikiinnityksin (1) sekä yläpohjan ilmansulkukalvo tuodaan vähintään sisäverhouslevyn yläreunan kiinnitysriman alapuolelle (2). Jokaisella rakennetyypillä on omat erityispiirteensä tiivistysten suhteen. (Aho, 2009)



Kuva 9. Kostean tilan toteutus puurankarakenteisessa talossa erillisellä kivirakenteisella sisäkuorella. (Aho, 2009)

Kosteat tilat aiheuttavat lisähaastetta etenkin puurankarakenteisissa taloissa, sillä kostean tilan seinä suositellaan tehtäväksi kivi- tai levyrakenteisena. Tämä voidaan toteuttaa siten, että korvataan kostean tilan kohdalta ulkoseinä kivirakenteella kokonaan tai tehdään erillinen sisäkuori kivi- tai levyrakenteisena. Puurakenteisen ulkoseinän ilmansulku voidaan poistaa kostean tilan kohdalta ja liittää ulkoseinä tiiviisti kostean tilan ilmansulkuun, mutta tätä ei lähtökohtaisesti suositella. Mikäli jätetään kaksi päällekkäistä ilmansulkukerrosta (ulkoseinän ilmansulku ja kostean tilan sisäkuori tai vedeneriste), tulee näiden väli rakentaa sisäilmaan tuulettuvaksi, kuten kuvassa 9. (Aho, 2009)



Kuva 10. Oven tiivistäminen puurankaiseen seinärakenteeseen. (Aho, 2009)

Ikkunat ja ovet tulee kiinnittää huolellisesti ulkoseinään tai kattoikkunan tapauksessa yläpohjaan. Ikkunoiden ja ovien ilmanpitävyys testataan nykyään erikseen ja niiden pitäisi olla itsessään hyvin tiiviitä. Kuvassa 10 on esitetty yksi tapa toteuttaa oven tiivis liitos ulkoseinään, siinä sisäpintaan tehdään elastinen kitta (1), jolla kalvomainen ilmansulku tiivistyy ovenkarmiin. Etenkin ovien tapauksissa säätö tehdään vielä jälkikäteen. Nykyaikaisia ovia pystytään säätämään ruuvisäätimillä lukon ja saranoiden kohdalta niin, että oven tiiviste vastaa ovenkarmiin, jolloin ovi on sulkeutuessaan hyvin ilmanpitävä. Säätövara on erityisen tärkeää, sillä ovet ja ikkunat saattavat painua vielä ensiasennuksen jälkeen oman painonsa johdosta. Hirsitaloissa painumavarat voidaan esimerkiksi teipata höyrynsulkuteipillä ja jättää teippaus listan taakse piiloon. (Aho, 2009)



Kuva 11. Ilmanvaihtokanavan tiivistäminen yläpohjan ilmansulkuun läpivientilaipalla ja teippaamalla.

Läpiviennit, kuten ilmanvaihtokanavat, sähköjohdot ja viemäriputket, tulee tiivistää rakenteisiin esimerkiksi teippaamalla, läpivientilaipalla, vaahdottamalla, kittaamalla tai valamalla. Valmiin läpivientilaipan käyttäminen (kuva 11) on helppoa yksittäisen läpiviennin kohdalla, mutta vaikeaa, kun läpivientejä tulee useita samasta kohtaa. Useamman läpiviennin tapauksessa voidaan tehdä esimerkiksi solumuovieristyslevystä mukautettu läpivientilaippa. Solumuovieristyslevyyn tehdään sopivat aukot läpivienneille ja niiden reunat tiivistetään polyuretaanivaahdolla tai kittaamalla. Levy tehdään koolausvälin levyiseksi ja päätyihin asennetaan ylimääräiset koolauspuut. Levy tiivistetään koolauspuihin polyuretaanivaahdolla siten, että vaahto yltää levyn taakse ehjään ilmansulkuun ja tiivistää näin ilmansulun reunatkin. Savuhormien tiivistyksessä on noudatettava samalla paloturvallisuusohjeita. Savuhormivalmistajilla on yleensä erilliset ohjeet hormin tiivistykseen ja myös niihin on olemassa tiivistyslaippoja. (Aho, 2009)

2.4. Lainsäädäntö ja ohjeet

Tässä luvussa kerrotaan Suomen lain velvoitteista sekä ohjeista ja standardeista liittyen rakennusten ilmatiiveyteen ja sen mittaukseen. Suomessa uudiskohteiden rakentamiseen vaadittava laadun minimitaso määritellään Rakentamismääräyskokoelmassa, jota julkaisee Ympäristöministeriö. Rakenteelliseen ilmatiiveyteen liittyvät määräykset ja ohjeet on asetettu Rakentamismääräyskokoelman osassa D3 Rakennusten energiatehokkuus (2012).

Asuntojen ilmanvaihtokertoimen tulisi olla nykyisten määräysten mukaan vähintään 0,5 1/h, eli koko talon ilmatilavuus tulisi vaihtua kerran kahdessa tunnissa. Tähän ilmanvaihtokertoimeen lasketaan mukaan hallittu ilmanvaihto ja vuotoilmanvaihto. (Ympäristöministeriö, 2011)

Määräysten mukaan rakennusvaipan ja tilojen välisten rakenteiden tulee olla niin ilmanpitäviä, etteivät niiden läpi kulkevat ilmavirtaukset aiheuta merkittäviä haittoja käyttäjille, rakenteille tai energiatehokkuudelle. Liitoksiin ja läpivienteihin tulee kiinnittää erityistä huomiota ja rakenteisiin tulee tarvittaessa tehdä erillinen ilmansulku. Rakennusvaipan ilmanvuotoluku q_{50} saa olla enintään $4 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$. Se voidaan poikkeuksellisesti ylittää vain jos käytön vaatimat rakenteelliset ratkaisut huonontavat merkittävästi ilmanpitävyyttä. On syytä huomata, että nämä vaatimukset ovat tulleet voimaan vasta vuoden 2012 määräyksissä. Vuoden 2012 määräyksillä rakennuttava on siis juridisesti huomattavasti paremmassa asemassa esimerkiksi reklamaatiotapauksissa, ja vastaavasti urakoitsija haastavammassa asemassa. (Ympäristöministeriö, 2011)

Määräysten mukaan pienempi ilmanvuotoluku kuin $4 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ voidaan osoittaa mittaamalla tai muulla menettelyllä. Muulla menettelyllä tiiveyden osoittamiseksi tarkoitetaan esimerkiksi teollisen talonrakennuksen laadunvarmistusmenettelyä, jolla voidaan ennakolta arvioida ilmanpitävyys luotettavasti. Tiiveysmittaus voidaan tehdä painekoemenetelmällä SFS-EN 13829 mukaan. Asuinkerrostaloissa tiiveys voidaan osoittaa mittaamalla vähintään 20 % huoneistoista. Mittaus voidaan tehdä rakennukseen myös rakennuksen omilla

ilmanvaihtokoneilla, jolloin enintään 25 % lämmitetystä nettopinta-alasta voidaan rajata pois mittauksesta. (Ympäristöministeriö, 2011)

Käyttötarkoitukseluokaltaan muut kuin pientalot, rivitalot ja asuinkerrostalot ohjeistetaan, muttei velvoiteta, varustamaan ilmanvaihtojärjestelmällä, jossa on mittausvalmius rakennuksen ilmanpitävyyden mittaukseen (Ympäristöministeriö, 2011). Käytännössä tämä tarkoittaisi sitä, että tuloilmakanavisto tulisi saada kiinni säätöpellein ja poistoilman ilmavirtaa tulisi pystyä säätämään ja mittaamaan kohtalaisen helposti. Poistoilmavirta voitaisiin mitata esimerkiksi suoraan koneen ohjauspaneelistä tai valmiiden mittausyhteiden avulla.

Mikäli parempaa ilmanpitävyyttä ei osoiteta, ilmanvuotolukuna käytetään $4 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ rakennuksen energiaselvityksessä. Lämpöhäviöiden tasauslaskennassa, joka on osa rakennuksen energiaselvitystä, ilmanvuotoluvun vertailuarvo on $2 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$. Mikäli ilmanpitävyyttä ei osoiteta, tai se on heikompia kuin $2 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$, joudutaan heikkoa ilmatiivyyttä kompensoimaan tasauslaskennassa energiatehokkaammilla rakenteilla tai ilmanvaihdon lämmöntalteenotolla, jotta energiamääräysten vaatimukset saadaan täytettyä. Vastaavasti parempi tiiveys mahdollistaa säästöjä rakenteissa tai ilmanvaihdossa. Tasauslaskennan lisäksi rakennuksen E-luku on laskettava energiaselvityksessä, ja sen tulee myös täyttää vaatimukset. (Ympäristöministeriö, 2011)

Rakennuttaja voi tietysti määrittää oman vaatimustasonsa, joka voi olla Rakentamismääräyskokoelmaa vaativampi. Yleensä rakennuttaja määrittää oman vaatimustasonsa q_{50} tai n_{50} lukuarvona urakkasopimuksessa tai energiatodistuksessa.

Rakennustietosäätiö RTS:n ohje RT 80-10974 sekoitetaan usein viralliseksi ohjeeksi, vaikka se on todellisuudessa tarkoitettu teollisten asuinrakennusten ilmatiivyyden ilmoitusmenettelyyn, eikä ohjeeksi yksittäisten rakennusten mittaukseen. Ohjeen mukaan pari- tai rivitalossa riittää yhden päätyhuoneiston mittaaminen ilmoitusmenettelyssä. Tämän perusteella on syntynyt myös käytännöksi se, että yksittäinenkin kohde hyväksytään yhden päätyasunnon mittauksen perusteella rakennusvalvonnassa. Rakennuttajat tilaavat usein

kohteisiinsa urakoitsijoilta tiiveysmittauksen RT-ohjeen mukaan. Myös rakennusvalvonta saattaa määrittää yksittäisiin kohteisiin ilmatiiveyden mittausvaatimukset eri tavoin kuin Rakentamismääräyskokoelmassa. Vaihtelevuus käytännöissä johtunee siitä, että viralliset lait ja standardit eivät määrittele mittauksen periaatteita riittävän yksiselitteisesti. (Rakennustietosäätiö RTS, 2009)

2.4.1. Ilmanvuotoluvun ilmoitusmenettely

Ilmoitusmenettelystä on laadittu Rakennustietosäätiö RTS:n ohje RT 80-10974 Teollisesti valmistettujen asuinrakennusten ilmanpitävyyden laadunvarmistusohje. Sen avulla teollisen asuinrakennusten valmistajan, kuten talotehtaan, on mahdollista käyttää ilmanvuotolukuna mitatun otoksen perusteella laskettua niin sanottua ilmoitettua ilmanvuotolukua. (Rakennustietosäätiö RTS, 2009)

RT 80-10974 mukaan pari- tai rivitalossa riittää yhden päätyhuoneiston mittaaminen. Kerrostalo voidaan mitata yksittäisistä huoneistoista, yhdestä tai useammasta kokonaisesta portaasta tai koko rakennuksesta. RT-ohjeen mukaan asuinkerrostaloissa yksittäisten huoneistojen mittauksen tapauksessa ilmanvuotoluvun määrittämiseen edellytetään muun muassa vähintään kolmen huoneiston mittausta kustakin talosta. (Ympäristöministeriö, 2011) (Rakennustietosäätiö RTS, 2009)

Ilmoitusmenettelyssä mitataan ensin vähintään kuusi samoilla toteutusratkaisuilla tehtyä samantyyppistä rakennusta satunnaisvalinnalla. Lisäksi tulee mitata seurantavaiheessa kolmen vuoden aikana vähintään kolme rakennusta. Näiden perusteella määritetään otoksen keskiarvo ja keskihajonta, joiden avulla saadaan ilmoitettu ilmanvuotoluku. Ilmoitettu ilmanvuotoluku on aina keskiarvoa heikompi. Seuranta vaatii lisäksi esimerkiksi tiivistysratkaisujen dokumentointia. Ilmoitettua ilmanvuotolukua voidaan käyttää samantyyppisten rakennusten ilmanvuotolukuna mittaamatta jokaista rakennusta erikseen. (Rakennustietosäätiö RTS, 2009)

2.5. Ilmatiiveysmittausten merkitys tuotannossa

Ilmanvuotoluku on melko luotettava ja objektiivinen laadun mittari. Koska hyvä ilmatiiveys saavutetaan vain huolellisella rakentamisella, kertoo hyvä vuotoluku myös huolellisesta rakennustyöstä ja siten yleisestä rakentamisen laadusta. Se on toki vain yksi pieni osa kokonaislaatua. Tulosten kehitystä on kuitenkin helppo seurata, sillä etenkin nykyään ilmanvuotolukuna käytetty q_{50} -luku on melko hyvin verrannollinen erilaisten rakennusten kesken. Talotehtaat ja rakennusliikkeet tuntevat yleensä kohtalaisen hyvin esimerkiksi oman keskimääräisen ilmanvuotolukunsa.

Ilmavuotokohdat tai vetoisuus ovat usein reklamaation kohteena talotehtaalte tai rakennusliikkeelle. Näissä tapauksissa ilmanvuotoluku voi olla jopa erinomainen, mutta on silti löytynyt yksittäinen tai useampi vuotokohta. Loppuasiakkaat, eli rakennuksen käyttäjät, ovat nykyään herkempiä pienillekin virheille. He tulkitsevat helposti värikkäät lämpökuvat vakavinakin virheinä tai siten, ettei uudessa rakennuksessa saisi olla yhtään vuotokohtaa. Vuotokohtien paikannusta ei kuitenkaan yleensä vaadita, joten usein mittauksen tilaajana toimiva urakoitsija pitääkin lämpökuvat sisäisenä laadunvarmistustietonaan, eikä välitä niitä loppuasiakkaalle. Urakoitsijan on toisaalta tässä vaiheessa vielä helpompi korjata viat, ennen kuin ne paljastuvat myöhemmässä vaiheessa tehtävässä varsinaisessa lämpökuvauksessa tai reklamaationa (vetoisuus tai kylmät pinnat). Takuukorjauksena korjaus tulisi todennäköisesti kalliimmaksi kuin rakennusvaiheessa. Parhaimmillaan tiiveysmittaus tehdään vaiheessa, jolloin kaikki läpiviennit on jo toteutettu, mutta seiniä tai kattoa ei ole vielä levytetty, jolloin löydetty vuotokohdat on vielä kohtalaisen helppo korjata.

Ilmavuotokohtien sijainnilla ja suuruudella on suuri merkitys siihen mitä vuotokohdasta aiheutuu. Esimerkiksi yläpohjan vuoto voi helpommin aiheuttaa kosteusteknistä riskiä. Alapohjan vuodot taas aiheuttavat helpommin vetoisuutta sekä radonin ja mikrobien päätymistä sisäilmaan. Etenkin talotehtaat pystyvät myös kehittämään tuotantoprosessejaan ja tuoteratkaisujaan löydettyjen vuotokohtien mukaan. (Aho, 2009) (Saari, 2014)

3. Mittausmenetelmät

Tässä luvussa kerrotaan nykyisistä mittausmenetelmistä ilmanvuotoluvun määrittämiseen ja ilmavuotokohtien paikantamiseen.

3.1. Ilmatiiveysmittaus

Ilmatiiveysmittaus painekoemenetelmällä on määritelty eurooppalaisessa standardissa Thermal performance of buildings - Determination of air permeability of buildings - Fan pressurization method - SFS-EN 13829. Se on Suomen Standardisoimisliitto SFS:n vahvistama englanninkielisenä suomalaiseksi kansalliseksi standardiksi. Tiiveysmittaus voidaan tehdä koko rakennukselle tai sen osalle. (Suomen Standardisoimisliitto SFS ry, 2001)

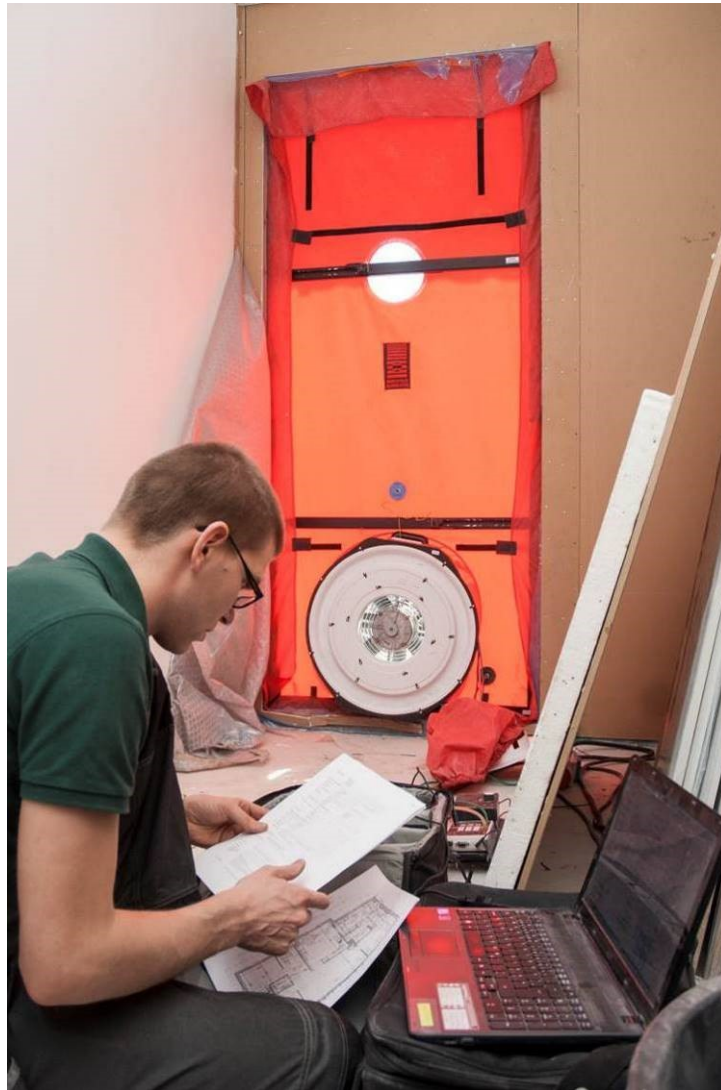
Tiivistykset ennen mittausta	Menetelmä	Välineet
Ilmanvaihtokone	<input type="checkbox"/> Kytetty pois päältä <input type="checkbox"/> Ei ilmanvaihtokonetta	
Ilmastointikanavat	<input type="checkbox"/> Sisäpuolelta (tulo- ja poistotilakanavat) <input type="checkbox"/> Ulkopuolelta (jäte- ja ulkoilmakanavat) <input type="checkbox"/> Ilmanvaihtokoneen kohdalta <input type="checkbox"/> Kohteessa ei ilmastointikanavia	<input type="checkbox"/> Muovikannet <input type="checkbox"/> Tiivistyspallo <input type="checkbox"/> Teipit <input type="checkbox"/> Muovit <input type="checkbox"/> Palo- tai säätöpellit
Liesituuletin	<input type="checkbox"/> Sisäpuolelta <input type="checkbox"/> Ulkopuolelta <input type="checkbox"/> Kohteessa ei liesituuletinta	<input type="checkbox"/> Muovikansi <input type="checkbox"/> Tiivistyspallo <input type="checkbox"/> Teipit <input type="checkbox"/> Muovit
Tulisijan savuhormi	<input type="checkbox"/> Ulkopuolelta <input type="checkbox"/> Sisäpuolelta <input type="checkbox"/> Kohteessa ei tulisijaa	<input type="checkbox"/> Tiivistyspallo <input type="checkbox"/> Teipit <input type="checkbox"/> Muovit
Tulisijan korvausilma	<input type="checkbox"/> Ulkopuolelta <input type="checkbox"/> Sisäpuolelta <input type="checkbox"/> Tulisijassa ei erillistä korvausilmakanavaa <input type="checkbox"/> Kohteessa ei tulisijaa	<input type="checkbox"/> Tiivistyspallo <input type="checkbox"/> Teipit <input type="checkbox"/> Muovit
Vienärit		<input type="checkbox"/> Vettä hajuluukoihin <input type="checkbox"/> Muovikannet <input type="checkbox"/> Tiivistyspallo <input type="checkbox"/> Teipit <input type="checkbox"/> Muovit
Keskuspölynimuri	<input type="checkbox"/> Ulkopuolelta <input type="checkbox"/> Sisäpuolelta <input type="checkbox"/> Kohteessa ei keskuspölynimuria	<input type="checkbox"/> Tiivistyspallo <input type="checkbox"/> Teipit <input type="checkbox"/> Muovit
Tekninen tila	<input type="checkbox"/> Läpiviennit suljettu <input type="checkbox"/> Ei erillistä teknistä tilaa	<input type="checkbox"/> Tiivistyspallo <input type="checkbox"/> Teipit <input type="checkbox"/> Muovit
Puukiuas	<input type="checkbox"/> Sisäpuolelta <input type="checkbox"/> Ulkopuolelta <input type="checkbox"/> Kohteessa ei puukiuaa	<input type="checkbox"/> Tiivistyspallo <input type="checkbox"/> Teipit <input type="checkbox"/> Muovit
Ikkunat, ovet ja muut	<input type="checkbox"/> Kaikki ikkunat ja ovet suljettu <input type="checkbox"/> Kaikki näkyvillä olevat muut väliaikaiset reiät tukittu	

Kuva 12. Tiivistykset ennen mittausta. Ote mittauspöytäkirjasta.



Kuva 13. Läpivientien sulkemista: ilmanvaihtokanavien sulkeminen tiivistyspallolla ilmanvaihtokoneelta (vasemmalla) ja tulisijan savuhormin sulkeminen teippaamalla katolta käsin (oikealla).

Standardi sisältää kaksi menetelmää, eli menetelmät A ja B. Erona näissä on eritasoinen läpivientien sulkeminen ennen mittauksen tekemistä. Menetelmässä A suljetaan käytännössä ainoastaan ovet, ikkunat ja tulisijojen luukut. Yleisempi on kuitenkin menetelmä B, joka on myös Suomessa käytössä. Jatkossa puhutaankin vain tästä menetelmästä. Siinä suljetaan kaikki tarkoituksenmukaiset läpiviennit, kuten ikkunat, ovet, tulisijojen luukut, postiluukut, ilmanvaihtokanavistot, tulisijan tai puukiukaan hormi ja korvausilma, viemärit, keskuspolynimurin läpivienti ja muut väliaikaiset läpiviennit (kuva 12). Tiivistyksissä hyödynnetään palo- tai säätöpeltejä, muovikansia ja vedellä täytettyjä hajulukkoja. Lisäksi käytetään tiivistyspalloja (amerikkalaisen jalkapallon sisäkumi), muoviva ja teippejä (kuva 13). Läpivientien tiivistyksille on usein vaihtoehtoisia menetelmiä, esimerkiksi sisä- tai ulkokautta tiivistäminen. (Suomen Standardisoimisliitto SFS ry, 2001)

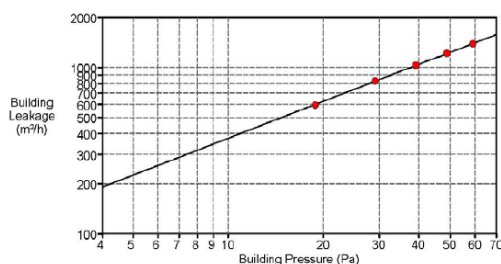


Kuva 14. Minneapolis BlowerDoor Standard Model 4 asennettuna pientalon ulko-oveen.

Mittauslaitteiston tarkkuusvaatimuksina ovat paine-eron mittaus ± 2 Pa tarkkuudella 0-60 Pa alueella, ilmvirran mittaus ± 7 % tarkkuudella ja lämpötilojen mittaus ± 1 K tarkkuudella. Yleensä käytetään kaupallista paineovilaitteistoa. Paineovi asennetaan oven paikalle ja niitä voidaan tarvittaessa yhdistää useampia laitteistoja yhteen mittaukseen. Esimerkiksi kuvassa 14 esitetty paineovilaitteisto pystyy mittaamaan 19–7200 m³/h 50 pascalin paine-erolla. Suurissa rakennuksissa voidaan käyttää useita tai suurempia puhallinlaitteistoja, mutta myös rakennuksen omia ilmanvaihtokoneita mittauksessa. (Suomen Standardoimisliitto SFS, 1989)

Apumittaustuloksina tarvitaan ilmanpaine ulkona, lämpötilat ulkona ja sisällä (tai tilojen välillä) sekä tuulen nopeus ja suunta. Näiden avulla voidaan määrittää ilman tiheys, jolloin se voidaan huomioida tulosten laskennassa. Tuulen nopeuden määrittäminen liittyy ainoastaan virhearviointiin. Tuuli vaikuttaa rakennuksen painesuhteisiin sekä puhallinlaitteiston toimintaan. (Suomen Standardisoimisliitto SFS ry, 2001)

Test Results at 50 Pascals:			
V50: Airflow (m ³ /h)	1233	(+/- 0.2 %)	
r50: Air Changes per Hour (1/h)	3.02		
w50: m ³ /(h·m ² Floor Area)	7.17		
q50: m ³ /(h·m ² Surface Area)	3.49		
Leakage Areas:			
	419.2 cm ² (+/- 1.1 %)	Canadian EqLA @ 10 Pa	or 1.19 cm ² /m ² Surface Area
	205.5 cm ² (+/- 1.7 %)	LBL ELA @ 4 Pa	or 0.58 cm ² /m ² Surface Area
Building Leakage Curve:			
	Air Flow Coefficient (C _{env}) = 67.4 (+/- 2.7 %)		
	Air Leakage Coefficient (CL) = 68.6 (+/- 2.7 %)		
	Exponent (n) = 0.739 (+/- 0.007)		
	Correlation Coefficient = 0.99986		
Test Standard:	EN 13829	Test Mode:	Depressurization
Type of Test Method:	B	Regulation complied with:	
Equipment:	Model 4 (230V) Minneapolis Blower Door, S/N CE3410		
Inside Temperature:	22 °C	Volume:	408 m ³
Outside Temperature:	1 °C	Surface Area:	353 m ²
Barometric Pressure:	101250 Pa	Floor Area:	172 m ²
Wind Class:	0 Calm	Uncertainty of Building Dimensions:	5 %
Building Wind Exposure:	Partly Exposed Building	Year of Construction:	2008
Type of Heating:			
Type of Air Conditioning:			
Type of Ventilation:	None		



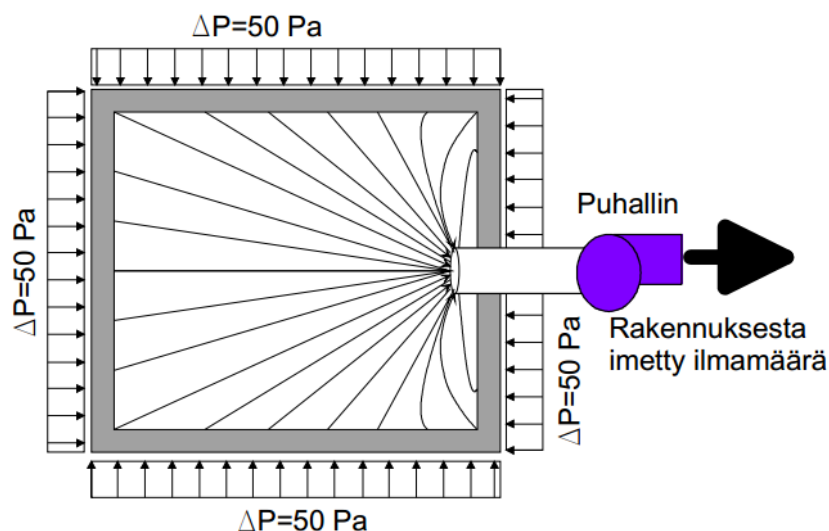
Kuva 15. Ohjelmiston (TECTITE Express 3.6) laatima vuotokäyrä.

Tiiveysmittauksessa mitataan ilmvirtaus ja paine-ero vähintään viidessä pisteessä. Pisteet ovat sijoitettu paine-eron mukaan tasavälein (enintään 10 Pa). Pienin mittauspiste tulee olla vähintään 10 Pa tai viisi kertaa nolatilanteen paine-ero, joka myös mitataan. Suurin paine-eron ja virtauksen mittauspiste tulisi tehdä vähintään 50 Pa kohdalla, mutta suurissa rakennuksissa riittää 25 Pa. Mittauspisteistä piirretään vuotokäyrä, kuten kuvassa 15. Mittaustarkkuuden kannalta suuremmassa paine-erossa tehdyt mittaukset ovat tarkempia, mutta liian suuri paine-ero voi rikkoa rakenteita, kuten irrottaa höyrynsulkuteippauksia tai tiivisteitä. Mittaus suositellaan tehtäväksi sekä ali- että ylipaineessa, mutta sitä

ei vaadita standardissa. Yleensä tehdäänkin mittaus pelkästään alipaineessa. (Suomen Standardisoimisliitto SFS ry, 2001)

Lopullisia tuloksia varten tulee myös laskea ilmatilavuus ja rakennusvaipan pinta-ala. Rakennusvaipan pinta-alaan lasketaan alapohja, yläpohja ja seinät sisältäen ikkunat ja ovet. Jos tilat rajoittuvat sisärakenteisiin (esimerkiksi asuinhuoneiston mittaus kerrostalossa), lasketaan nämä sisärakenteet rakennusvaipan pinta-alaan mukaan. Mittaukset voidaan tehdä esimerkiksi laseretäisyysmittarilla tai laskea piirustuksista. (Suomen Standardisoimisliitto SFS ry, 2001)

Vuotokäyrän avulla interpoloitu ilmavirta tuotetussa 50 pascalin paine-erossa jaetaan rakennusvaipan pinta-alalla, jolloin saadaan tuloksena rakennusvaipan ilmanvuotoluku q_{50} . Lisäksi saadaan rakennuksen ilmanvuotoluku n_{50} jakamalla ilmavirta rakennusvaipan pinta-alan sijaan ilmatilavuudella. Mitä suurempi rakennus, sitä pienempi n_{50} -luku, koska vaipan pinta-ala ei tavallisesti kasva yhtä nopeasti kuin ilmatilavuus rakennuksen mittojen kasvaessa. Vuosien 2012 ja 2013 aikana onkin siirrytty kokonaan n_{50} -luvun käytöstä q_{50} -lukuun Rakentamismääräyskokoelmassa, koska q_{50} -luku on paremmin verrannollinen erikokoisten rakennusten kesken. (Suomen Standardisoimisliitto SFS ry, 2001) (Paloniitty, 2012)



Kuva 16. Painekekeen periaate (alipainemittaus) (Leivo, 2003)

Ilmanvuotoluku q_{50} kertoo kuinka monta kuutiota tunnissa menee keskimäärin ilmaa vuotokohtien läpi yhden rakennusvaippaneliön alueelta 50 pascalin paine-erolla (kuva 16). Koska 50 pascalin paine-ero ei ole normaali käyttötilanne, muunnetaan energialaskennassa q_{50} -luku vuotoilmavirraksi jakamalla se kokeellisen kertoimen avulla (x-kerroin), joka on yksikerroksisille rakennuksille 35, kaksikerroksisille 24, kolmi- ja nelikerroksisille 20 ja viisikerroksisille tai korkeammille rakennuksille 15. Tässä huomioidaan vain maanpinnan yläpuoliset kerrokset. (Ympäristöministeriö, 2012)(Suomen Standardisoimisliitto SFS ry, 2001)

3.2. Ilmavuotokohtien paikannus

Ilmavuotokohtien paikantamiseen ei ole olemassa yleistä standardia tai muutakaan ohjetta sen järjestelmälliseen tekemiseen. Paikannuksessa on selkeitä haasteita, jotka tulisi ratkaista kehittämällä menetelmää standardinomaisemmaksi. Menetelmä perustuu yleensä mittaajan ammattitaitoon ja on siten subjektiivinen. Parhaimmillaan se voisi olla objektiivinen menetelmä, jonka avulla voitaisiin esittää vuodon suuruus ja syy. Sen avulla voitaisiin myös ratkaista erimielisyydet osapuolien, kuten talotehtaan, rakennusliikkeen, rakennustuotetoimittajan ja rakennuttajan välillä. Erimielisyyksien osalta vuotokohtatapauksissa lainsäädäntö on hyvin epäselvää. Rakennusvaiheessa tehdyllä ilmavuotokohtien paikannuksella voidaan välttyä kalliilta jälkikorjauksilta ja osapuolien riidoilta.

Ennen varsinaista ilmanvuotoluvun määrittämistä suositellaan paine-eron ylläpitämistä 50 pascalissa, jotta voidaan etsiä vuotokohdat ja havaita mahdolliset viat läpivientien sulkemisessa (Suomen Standardisoimisliitto SFS ry, 2001). Virheet tai puutteet läpivientien sulkemisessa voidaan korjata samalla, kun tehdään vuotokohtien paikannusta.

Mahdollisia menetelmiä vuotokohtien tutkimiseen on lämpökamerakuvaus (alipaineessa), käsin tunnustelu (alipaineessa), ilmavirtausmittaukset, merkkisavukokeet (ylipaineessa tai alipaineessa), merkkiainetutkimus ja akustiset menetelmät. (Rakennustietosäätiö RTS, 2009) (Paloniitty, 2012)

3.2.1. Lämpökamerakuvaus

Tavallisessa lämpökuvauksessa käytetään lämpötilaindeksiä. Lämpötilaindeksi mahdollistaa pintalämpötilojen vertailun erilaisissa lämpöolosuhteissa. Lämpötilaindeksi on määritelty Asumisterveysohjeessa:

$$TI = \frac{T_p - T_u}{T_s - T_u} \quad (1)$$

TI = Lämpötilaindeksi (Thermal Index)

T_p = Sisäpinnan lämpötila (lämpökameralla tai muulla mitattu)

T_u = Ulkoilman lämpötila

T_s = Sisäilman lämpötila

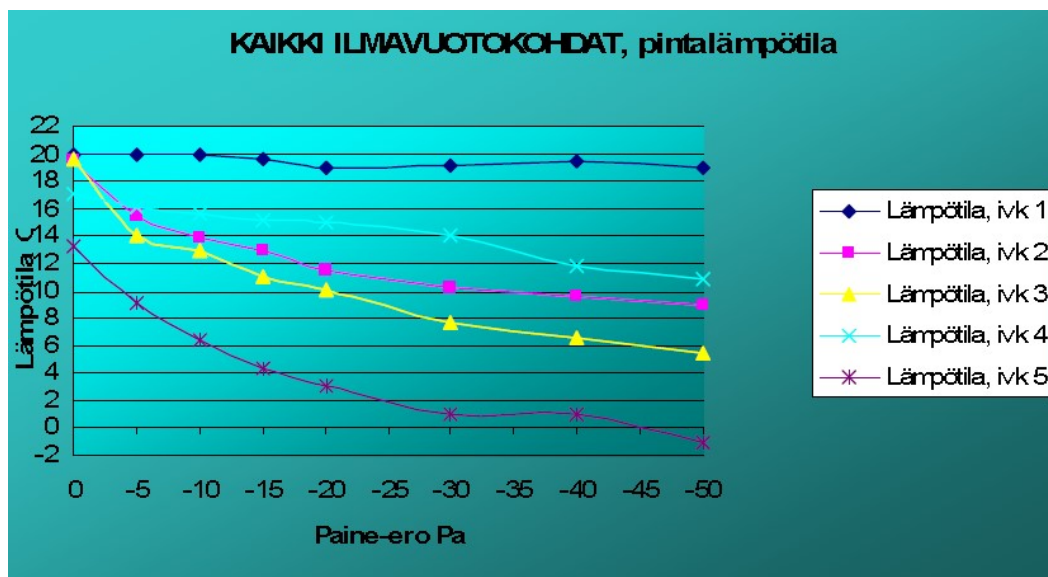
(Sosiaali- ja terveysministeriö, 2003)

Seinän ja ulkovaipan liitoskohtien sekä läpivientien pistemäistä lämpötilaa kuvaava välttävän tason lämpötilaindeksi on $\geq 61 \%$ ja hyvän tason $\geq 65 \%$. Uudiskohteissa tulisi täyttää hyvä taso ja olemassa olevissa rakennuksissa välttävä taso. (Sosiaali- ja terveysministeriö, 2003)

Taulukko 1. Luokitukset lämpötilaindeksin mukaan. Seinän ja ulkovaipan liitoskohtien sekä läpivientien pistemäiset lämpötilat. (Sosiaali- ja terveysministeriö, 2003)

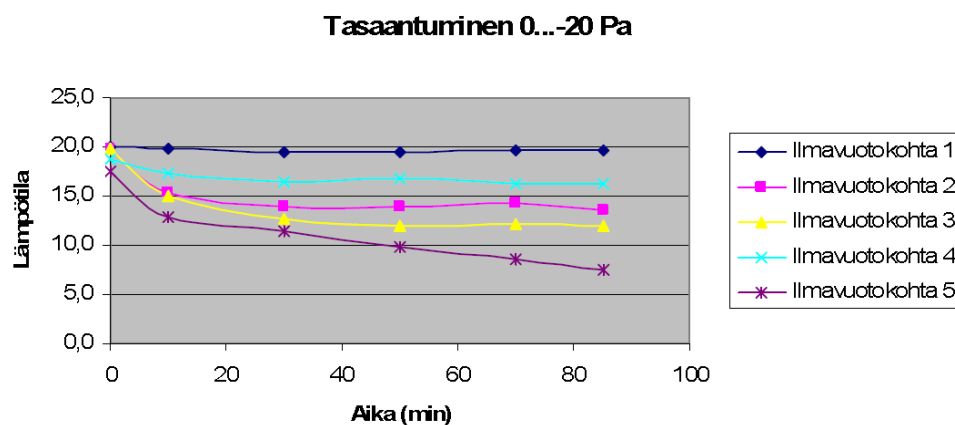
Lämpötilaindeksi	Asumisterveysohjeen luokitus
Alle 61 %	Ei täytä välttävää tasoa
61 % tai suurempi, mutta alle 65 %	Välttävä
65 % tai suurempi	Hyvä

Ilmavuotokohtien pinnan lämpötilaan vaikuttaa kuitenkin myös paine-ero. Tämän takia tiiveysmittauksessa 50 pascalin alipaineessa ilmavuotokohtat korostuvat, kun ne viilenevät selvästi enemmän. Lämpötilaindeksi onkin suunniteltu käytettäväksi normaalitilanteessa, mutta ei tavallista suuremmassa alipaineessa. Matalampi pintalämpötila kertoo kuitenkin vuodon suuruudesta myös alipainekuvauksessa.



Kuva 18. Ilmavuotokohtien viileneminen erilaisissa paine-erotilanteissa. (Immonen, 2008)

Lämpötilaindeksissä ei huomioida rakennuksessa vallitsevaa paine-eroa. TKK:n LVI-tekniikan laboratoriossa tehdyssä insinöörityössä pyrittiin selvittämään paine-eron vaikutusta ilmavuotokohtiin. Kokeessa tehtiin rakenteeseen viisi erilaista ilmavuotokohtaa ja tutkittiin ilmavuotokohtien viilenemistä eri painesuhteissa (kuva 18). Ilmavuotokohtien annettiin tasaantua eri paine-eroissa 90 minuuttia. Sisälämpötila 21°C ja ulkolämpötila -8,5°C. Tutkimuksen perusteella lämpötilaindeksin ja paine-eron suhde ei ole suoraan verrannollinen eikä lämpötilaindeksin laskentaan ole laadittavissa paine-eroa huomioivaa termiä. (Immonen, 2008)



Kuva 19. Ilmavuotokohtien tasaantuminen paine-eron muutoksessa. (Immonen, 2008)

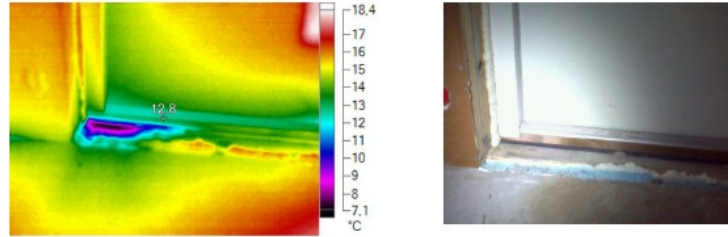
Samassa insinööriyössä selvitettiin myös ilmavuotokohdan viilenemisen tasaantumisaikaa paine-eron muutoksen jälkeen. Kuvasta 19 nähdään, että 20 pascalin alipaineessa viilentävä vaikutus näkyy hyvin jo kymmenessä minuutissa. Melko hyvin vuotokohdat ovat tasaantuneet lopulliseen lämpötilaansa 30 minuutin kuluttua, mutta lopullinen tasaantuminen voi joissain tapauksissa kestää jopa yli 80 minuuttia. Sisälämpötila oli testissä 21°C ja ulkolämpötila -8,5°C. Normaali testauspaine-ero on 50 pascalia tutkitun 20 pascalin sijaan, joten muutosten pitäisi silloin näkyä hieman nopeammin. Ilmavuotokohtien paikannus lämpökameralla vaatii siis vähintään 5-10 minuutin tasaantumisaajan 50 pascalin alipaineessa ennen kuin kuvaus voidaan aloittaa. Alipainetta pidetään yllä koko paikannuksen ajan. (Immonen, 2008)

Normaalitilanteen lämpökuvauksessa vaadittava lämpötilaero on vähintään 15 astetta (Rakennusteollisuus RT ry, 2005). Alipainekuvauksessa ilmavuotokohdat löydetään lämpökameralla jo muutaman asteen lämpötilaeron vallitessa sisä- ja ulkoilman välillä. Tarkasti vuotokohdat löytyvät, kun lämpötilaeroa on yli 10–15 astetta. Helpoiten ja eniten vuotoja löytyykin lämpötilaeron ollessa suuri, eli talvikaudella. Tällöin löydetään myös pienet vuotokohdat.

Lämpökamera on hyvä menetelmä vuotokohdan paikantamiseen, mutta vuodon suuruuden toteaminen ja vuotokohdan erottaminen kylmäsillasta (esimerkiksi eristepuutos tai nurkkaliitos) on vaikea tehdä pelkästään lämpökameralla. Lämpökamerakuvaus on nopea menetelmä moniin muihin menetelmiin nähden, mutta tarkoitukseen riittävän hyvät lämpökamerat maksavat useista tuhansista euroista kymmeniin tuhansiin. Mitä tarkempi kamera, sitä paremmin havaitaan pienetkin vuotokohdat.

Kuva (10)

8.1.2014 10:15:09



Tupakeitti: ilmavuotoa terassin oven kynnyksen alta vasemmasta alakulmasta.

Emissiokerroin:	0,95
Heijastunut lämpötila:	15,8 °C

Nimi	Lämpötila	Emissiivisyys	Tausta
Keskipiste	12,8°C	0,95	15,8°C

Kuva 20. Esimerkki lämpökameralla raportoidusta vuotokohdasta.

Lämpökuvan yhteydessä tulisi olla riittävät tiedot, kuten emissiokerroin ja lämpötilaväriskaala, jotta kuvia voidaan tulkita objektiivisesti (kuva 20). Ilman riittäviä tietoja lämpökuvia voitaisiin muokata ja tulkita helposti väärin. Rakennusteollisuus RT:n ohjeessa Ratu 1213-S on annettu ohjeet kuvien vakiotyyppiseen jälkianalysointiin normaalissa lämpökuvauksessa. Näitä ohjeita voidaan soveltaen noudattaa myös alipaineisessa lämpökamerakuvauksessa. (Rakennusteollisuus RT ry, 2005)

3.2.2. Käsin tunnustelu

Käsin tunnustelu alipaineessa (kuva 21) on erinomainen menetelmä vuotokohdan erottamiseen kylmäsillasta sekä sen tarkempaan paikantamiseen. Suuresta lämpötilaerosta (talvikausi) on etua, mutta selkeät ilmavuodot tuntee myös ilman lämpötilaeroa. Kesäkaudella, kun lämpökamera ei havaitse vuotokohtia enää tarkasti, pystyy käsin tunnustellen tutkia melko nopeasti pienehkön rakennuksen, kuten omakotitalon. Tällöin kokeillaan ajan säästämiseksi kaikki yleiset vuotopaikat, eli erilaiset liitoskohdat.



Kuva 21. Vuotokohtien paikannus voidaan tehdä lämpökameralla ja löydetyt kohdat ja vuotojen suuruus todentaa käsin tunnustelemalla.

3.2.3. Ilmavirtausmittaus

Ilmavuotokohtia voidaan paikantaa myös ilmavirtausmittauksella. Ilmavirtausmittaus vuotokohdasta olisi järkevää tehdä aivan vuotokohdan vierestä anemometrilla. Tähän voitaisiin käyttää suuntariippumatonta kuumalanka-anemometriä (kuva 22). Anturi mittaa tyypillisesti virtauksen nopeutta ja lämpötilaa. Se mahtuu pieniin väleihin ja paikkoihin, ja ottaa tuloksia melko pistemäisesti ja virtauksen suunnasta riippumatta. Etuna on myös se, että kuumalanka-anturit mittaavat usein samalla myös lämpötilaa. Kuumalanka-anturit ovat myös hyvin edullisia ja nopeita käyttää, joten sellainen soveltuisi hyvin kenttätööhön. Virtausnopeus tulisi mitata muutaman minuutin keskiarvona, sillä ilman nopeus vaihtelee. Tämän lisäksi pitäisi arvioida vuotokohdan laajuutta. Kesäaikaan virtaus voisi olla helpommin tunnistettavissa anemometrilla kuin kädellä tunnustellen. Menetelmän heikkoutena on sen paikallisuus, eli samoin kuin käsin tunnustellessa sillä täytyisi käydä läpi jokainen liitoskohta erikseen. Toisaalta pitkällä anturilla tehtynä työ voisi olla joissain tapauksissa nopeampaa ja ainakin ergonomisempaa kuin käsin tunnusteltuna.



Kuva 22. Kuumalanka-anemometri. (Trotec, 2014)

3.2.4. Merkkisavukoe

Merkkisavuja on saatavilla esimerkiksi merkkisavuampulleina, savukyninä ja savukoneina. Merkkisavu on näkyvää savua tai kaasumaista ainetta. Sen avulla vuotokohdat voidaan havaita muutamallakin erilaisella tavalla. Työläin vaihtoehto on katsoa mistä savu paljastuu rakenteen toiselta puolelta (kuva 23). Hieman helpompia vaihtoehtoja on katsoa ylipainetilanteessa sisäpuolelta mihin kohtaan savu kulkeutuu tai alipainetilanteessa seurata lähteekö savu takaisinpäin mahdollisen vuotokohdan kohdalla. Merkkisavukoe on menetelmänä edullinen, mutta hyvin paikallinen, kuten ilmavirtausmittaus. Merkkisavu voi laukaista palohälyttimiä, mikäli sellaisia on jo rakennukseen asennettu. (Paloniitty, 2012)



Kuva 23. Kannettava savukone ja merkkisavukoe (APEX Energy Management Solutions, 2014).

3.2.5. Merkkiainetutkimus

Merkkiainetutkimuksessa tilaan tai rakenteeseen laitetaan kaasuseosta, joka sisältää merkkiainetta. Merkkiaineena käytetään esimerkiksi kaasuseosta, jossa on 5 % vetyä ja 95 % typpeä, jolloin vety toimii merkkiaineena. Tämä merkkiaine tai sen konsentraatio voidaan sitten mitata siihen suunnitellulla mittarilla (kuva 24). Merkkiainetta voidaan esimerkiksi syöttää rakenteeseen ja sitten mitata sitä huoneen ilmatilasta. Käsianturilla voidaan paikantaa tarkasti vuodon sijainti. Menetelmä on tarkka ja sitä käytetään enemmän korjauskohteissa, kun halutaan selvittää esimerkiksi sisäilmaongelmia. Merkkiaineella voidaan paikantaa myös rakennuksen sisäisiä, kuten mikrobiperäisen hajun tai tupakansavun, vuotoreittejä. Se on kuitenkin melko kallis ja hidas menetelmä. (SFS, 2001) (Pietiko Oy, 2014) (Hintikka, 2014)



Kuva 24. Merkkiainekoe ja koelaitteisto (Hintikka, 2014)

3.2.6. Akustiset menetelmät

Akustiset menetelmät perustuvat siihen, että ilma kuljettaa ääntä ja näiden äänilähteiden sijainnit voidaan paikantaa. Ilmavuotokohtien paikannusta varten laitetaan rakenteen toiselle puolelle äänilähde ja sitä mitataan toiselta puolelta. Äänilähteeksi käy myös esimerkiksi talon paineistaminen paineovilaitteistolla,

mutta voidaan käyttää myös erillistä ääni- tai ultraäänilähdettä. Vastaanottavalla puolella on yksi tai useampi mikrofoni. Jos käytetään useampaa mikrofonia, niin vuotokohdat voidaan jopa kuvata kehittyneiden algoritmien avulla vähän samalla tapaa kuin lämpökameralla (kuva 25). Tällaista laitteistoa kutsutaan akustiseksi kameraksi. Akustiset kamerat ovat kalliita, kymmenistä tuhansista satoihin tuhansiin euroihin. Edullisemmat akustiset menetelmät taas ovat hyvin paikallisia tutkimusmenetelmiä, joissa mikrofoni on laitettava aivan vuotokohdan lähelle. Tällä hetkellä edullisempi akustinen menetelmä voisi siis olla vaihtoehto käsin tunnustelulle tai vuotokohdan ilmavirtausmittaukselle. (MIP Electronics Oy, 2014) (Saurama, 2013) (Ganesh Raman, 2014)



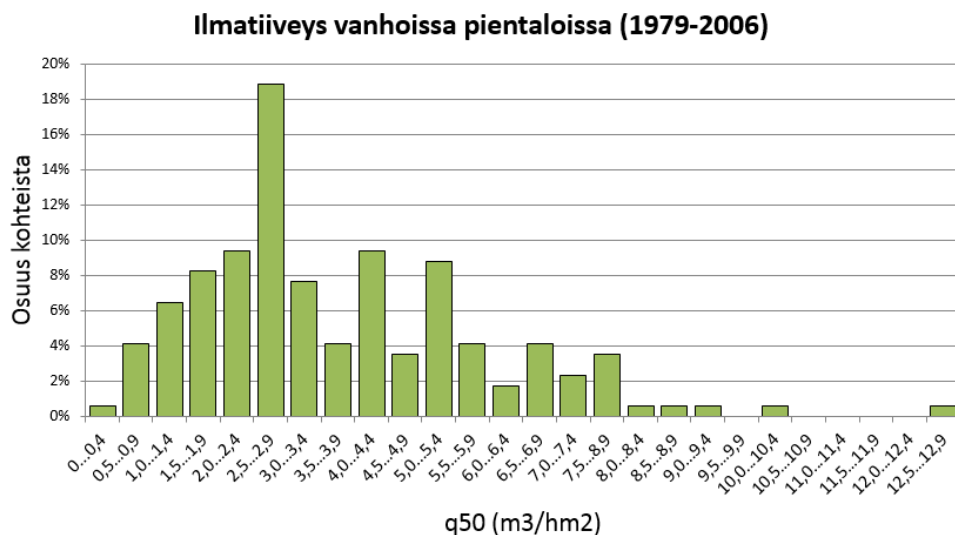
Kuva 25. Akustisen kameran kuvaa rakennuksen ilmavuodosta. (Ganesh Raman, 2014)

4. Ilmatiiveyden mittaustuloksia

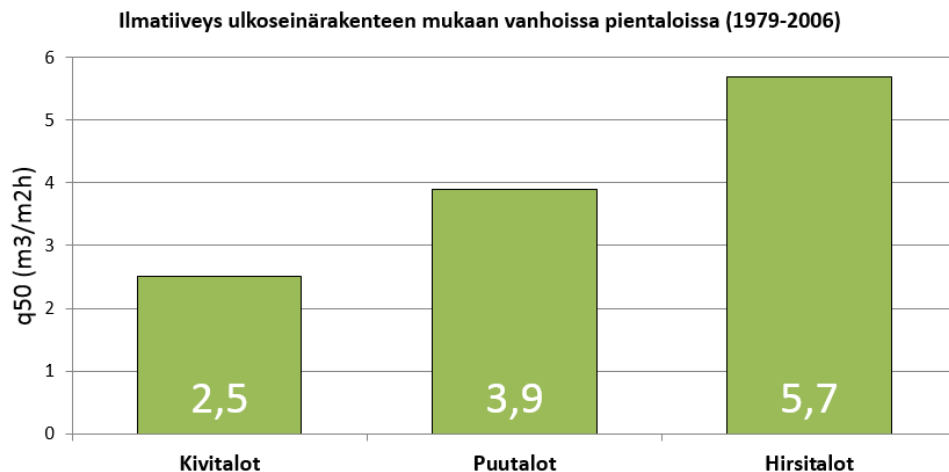
Ilmatiiveyttä on tutkittu Suomessa ja maailmallakin viime vuosikymmeninä runsaasti. Kaupallisesti mittaukset ovat yleistyneet Suomessa vasta noin viiden vuoden aikana, kun energiatehokkuusmääräykset ovat tiukentuneet. Tässä kappaleessa esitellään ilmanvuotolukujen mittaustuloksia. Olemassa olevien pientalojen tulokset perustuvat kokonaan aiempiin tutkimuksiin. Uudispientaloissa on käsitelty laajaa uutta aineistoa, joka perustuu tehtyihin mittauksiin. Uusia tuloksia on verrattu myös aiempiin tutkimuksiin uudispientaloista.

4.1. Olemassa olevat pientalot

Kahden pientaloja koskevan aiemman tutkimuksen tiiveysmittaustulokset kerättiin yhteen (kuva 26). Tulokset ovat peräisin Tampereen Teknillisen Yliopiston julkaisuista Puurunkoisten pientalojen kosteus- ja lämpötilaolosuhteet, ilmanvaihto ja ilmatiiviys (2005) sekä Asuinrakennusten ilmanpitävyys, sisäilmasto ja energiatalous AISE (2009). Vanhat pientalot ovat valmistuneet vuosina 1979—2006. Niiden keskiarvo q_{50} -lukuna oli $3,7 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$. (Vinha, 2009) (Vinha, 2005)



Kuva 26. Ilmatiiveys vanhoissa pientaloissa, 1979–2006 valmistuneet (n = 170). (Vinha, 2009) (Vinha, 2005)

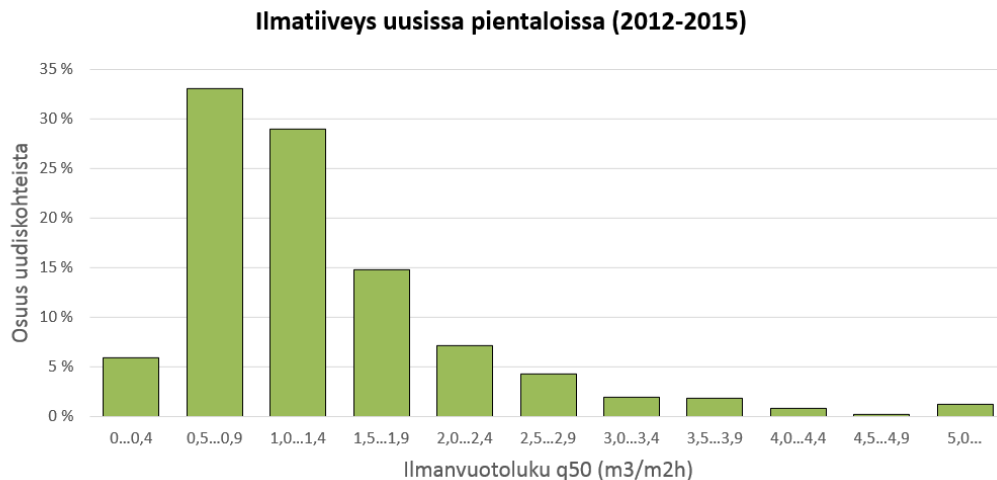


Kuva 27. Ilmatiiveys ulkoseinärakenteen mukaan vanhoissa pientaloissa, 1979-2006 valmistuneet. (n = 40 kivitaloa, 102 puutaloa ja 21 hirsitaloa) (Vinha, 2009) (Vinha, 2005)

Kuvassa 27 on esitetty ilmanvuotolukujen keskiarvot ulkoseinärakenteen mukaan olemassa olevissa pientaloissa. Puutalolla tarkoitetaan ulkoseinältään puurunkoista taloa, jossa voi olla julkisivuna puujulkisivu, rappaus tai tiilijulkisivu. Kivitalolla tarkoitetaan ulkoseinältään kivirunkoista (esimerkiksi betoni, harkko tai tiili) taloa, jossa voi olla vielä vastaavasti puujulkisivu, rappaus tai tiilijulkisivu. Hirsitalolla taas tarkoitetaan ulkoseinärakenteeltaan hirsirunkoista taloa. Kantava ulkoseinärakenne on siis ratkaiseva mihin kategoriaan talo lasketaan. Kivitalot olivat selvästi tiiviimpiä, sitten puutalot ja viimeisenä hirsitalot. (Vinha, 2009) (Vinha, 2005)

4.2. Uudispientalot

Tässä työssä käsiteltiin laajaa uutta kokeellista aineistoa, joka perustuu Vertia Oy:n tekemiin 898 uudispientaloasunnon tiiveysmittaukseen. Mittaukset on tehty kaupallisina tilauksina, eikä satunnaisotantana, joten ne eivät täydellisesti edusta kaikkia uudispientaloja. Uudet pientalot ovat valmistuneet vuosina 2012–2015 tai olivat mittaushetkellä vielä valmistumassa. Pientaloiksi on laskettu omakotitalot, paritalot, rivitalot ja loma-asunnot. Mittaukset on tehty aikavälillä 4.1.2012–23.1.2015.



Kuva 28. Ilmatiiveys mitatuissa uusissa pientaloissa, 2012–2015 valmistuneet. (n = 898)

Kuvassa 28 on esitetty ilmanvuotoluvun q_{50} jakauma tehdyissä mittauksissa. Kaikkien tulosten keskiarvo q_{50} -lukuna oli $1,4 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$. Keskimääräinen ulkovaipan sisäpinta-ala oli 384 m^2 ja ilmatilavuus 388 m^3 . Kuvaajasta havaitaan, että 98 % mitatuista kohteista alitti ilmanvuotoluvun $4,0 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$, joka on nykyisten määräysten suurin sallittu ilmanvuotoluku, jota toisaalta saa myös käyttää energiatodistuksessa mittaamatta rakennusta ollenkaan. Jopa 83 % kohteista alitti myös arvon $2,0 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$, joka taas on energiaselvityksen lämpöhäviöiden tasauslaskennan vertailuarvo. Jopa 39 % alitti myös arvon $1,0 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$, jota voidaan pitää jo kiitettävänä tuloksena. Kuitenkin mitatuista kohteista kohtalaisen heikon tuloksen $2,0\text{--}4,0 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ sai 15 % asunnoista ja heikon tuloksen yli $4,0 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ sai 2 % asunnoista. Suomessa rakennettiin vuonna 2013 yhteensä 11 200 pientaloasuntoa (Rakennustutkimus RTS Oy, 2014). Vuosittain siis arviolta noin 1680 uudessa pientaloasunnossa on kohtalaisen heikko ja 220 pientaloasunnolla heikko ilmatiiveys.

Rakennustutkimus RTS Oy on kysynyt pientalorakentajilta Omakotirakentaja 2012/2013 ja 2013/2014 Rakennusvaiheen tutkimuksissa ilmanvuotolukua. Tässä kyselyssä on kysytty rakennusvaiheessa joko suunniteltua tai mitattua ilmanvuotolukua (n_{50}). Ilmanvuotoluvut n_{50} ja q_{50} ovat melko vastaavia pientaloissa. Eroa niissä alkaa tulemaan enemmän vasta suurissa rakennuksissa. Toisaalta on huomioitava, että kyselyyn vastannut ei ole

välttämättä osannut edes erottaa näitä kahta lukua toisistaan, vaan on ilmoittanut löytämänsä ilmanvuotoluvun esimerkiksi tiiveysmittausraportista tai energiatodistuksesta. Yhteensä 2618 vastaajasta 15 % ilmoittaa vuotoluvun olevan mitattu tulos, 50 % ilmoittaa, että se mitataan, ja 35 % ilmoittaa, että sitä ei tulla mittaamaan. Ilmanvuotoluvun keskiarvo on ollut tässä kyselytuloksessa 1,5. Tämä vastaa hyvin mitattujen kohteiden keskiarvoa. Uudiskohteiden ilmatiiveys on siis huomattavasti paremmalla tasolla kuin olemassa olevien pientalojen, joiden keskiarvo oli 3,7 (Vinha, 2009) (Vinha, 2005). (Rakennustutkimus RTS Oy, 2013) (Rakennustutkimus RTS Oy, 2014)

Kyselystä huomataan myös, että mitä teollisempaa rakentaminen on, sitä useammin ilmatiiveys mitataan ja sen parempia ovat tulokset. Avaimet käteen rakennuttajista vain 25,6 % ilmoittivat, että ilmanvuotolukua ei mitata. Heidän tulostensa keskiarvo oli 1,4. Vastaavasti ei-avaimet käteen rakennuttajista 41,2 % vastasivat, että ilmanvuotolukua ei mitata ja tulosten keskiarvo oli 1,6. Avaimet käteen rakennuttamisella on tarkoitettu sitä, että rakennuttaja ei ole juurikaan osallistunut suunnitteluun, toteutukseen eikä hankintoihin. (Rakennustutkimus RTS Oy, 2013) (Rakennustutkimus RTS Oy, 2014)

Vuotokohtien aiheuttama energiankulutus voidaan laskea Rakentamismääräyskokoelman D5 laskentakaavojen mukaisesti:

$$Q_{vuotoilma} = \rho_i c_{pi} q_{v, vuotoilma} (T_s - T_u) \Delta t / 1000 \quad (2)$$

$Q_{vuotoilma}$	= vuotoilman lämpenemisen lämpöenergian tarve (kWh)
ρ_i	= ilman tiheys (kg/m ³)
c_{pi}	= ilman ominaislämpökapasiteetti (Ws/kgK)
$q_{v, vuotoilma}$	= vuotoilmavirta (m ³ /s)
T_s	= sisäilman lämpötila (°C)
T_u	= ulkoilman lämpötila (°C)
Δt	= ajanjakson pituus (h)
1000	= kerroin, jolla suoritetaan laatumuunnos kilowattitunneiksi (Ympäristöministeriö, 2012)

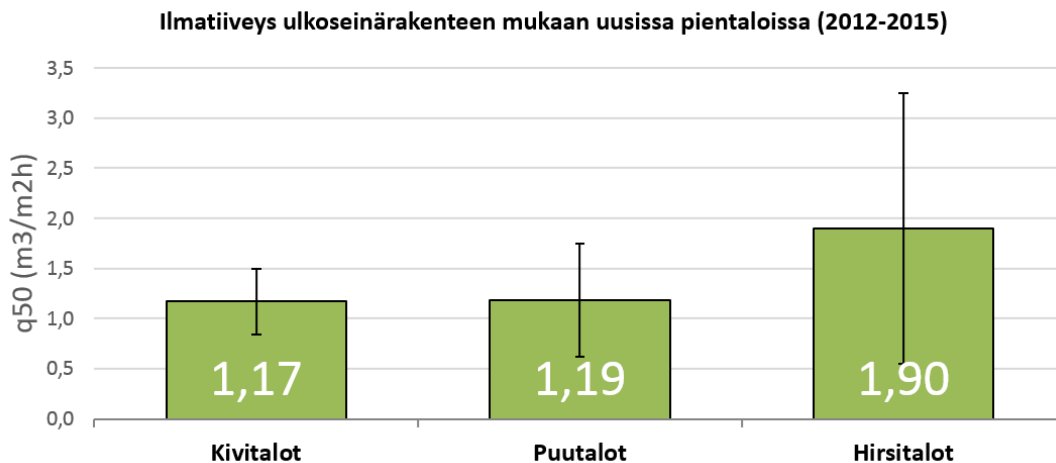
$$q_{v,vuotoilma} = \frac{q_{50}}{3600 \cdot x} A_{vaippa} \quad (3)$$

q_{50} = rakennusvaipan ilmanvuotoluku ($\text{m}^3/\text{m}^2\text{h}$)
 A_{vaippa} = rakennusvaipan pinta-ala (m^2)
 x = kerroin, joka on yksikerroksisille rakennuksille 35, kaksikerroksisille 24, kolmi- ja nelikerroksisille 20 ja viisikerroksisille tai korkeammille rakennuksille 15
3600 = kerroin, joka muuttaa ilmavirran m^3/h yksiköstä m^3/s yksikköön
(Ympäristöministeriö, 2012)

Taulukko 2. Energiankulutus ja kustannukset (sähkön hinnalla) vuotokohtien kautta tyypillisessä uudessa tai olemassa olevassa pientaloasunnossa.

	Ilmanvuotoluku q_{50} ($\text{m}^3/\text{m}^2\text{h}$)	Energiankulutus vuodessa (kWh)	Kustannukset vuodessa (€)
Vanha pientaloasunto	3,7	2660	310
Uusi pientaloasunto	1,4	1010	120

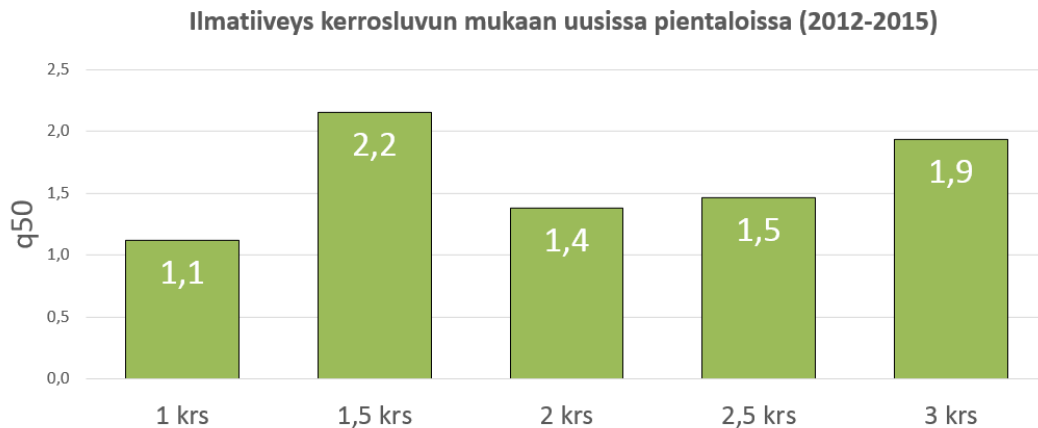
Taulukossa 2 on laskettu energiankulutus vuotokohtien kautta tyypilliselle pientaloasunnolle käyttäen arvoina $A_{vaippa} = 384 \text{ m}^2$ (aineiston keskimääräinen), $x = 24$ (1,5-kerroksinen tai kaksikerroksinen), $\rho_i = 1,2 \text{ kg/m}^3$, $c_{pi} = 1000 \text{ Ws/kgK}$, $T_s = 21 \text{ °C}$, $T_u = 5,6 \text{ °C}$ (säävyöhyke I tai II keskimäärin), $\Delta t = 8760 \text{ h}$ (vuosi) ja verraten tuloksia keskimääräisen uuden ja vanhan rakennuksen kesken, eli $q_{50} = 1,4 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ (uusi pientaloasunto) tai $q_{50} = 3,7 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ (vanha pientaloasunto). Lisäksi vuoden energiankulutus on muutettu lämmityskustannuksiksi sähkön keskimääräisellä kuluttajahinnalla $0,115 \text{ €/kWh}$ (Tilastokeskus, 2014). Keskimäärin uuden pientaloasunnon energiankulutus vuotokohtien kautta on vuosittain 1650 kWh pienempi ja kustannukset 190 euroa pienemmät. Laskenta on suuntaa antava, sillä se ei ota rakennusta kokonaisuutena huomioon. Tarkempi laskenta voitaisiin tehdä esimerkiksi simuloinnilla. (Ympäristöministeriö, 2011)



Kuva 29. Ilmatiiveys ulkoseinärakenteen mukaan uusissa pientaloissa, 2012–2015 valmistuneet. (n = 69 kivitaloa, 610 puutaloa, 218 hirsitaloa)

Kuvassa 29 on esitetty uudispientalojen ilmanvuotolukujen keskiarvot ja keskihajonnat ulkoseinärakenteen mukaan. Määrittävänä tekijänä on kantavan seinän materiaali (kuten olemassa olevissa pientaloissa kuvassa 27). Verrattuna olemassa oleviin pientaloihin, uudet kivitalot ovat edelleen olleet tiiviimpiä, sitten puutalot ja viimeisenä hirsitalot. Puutalot ovat käytännössä kuitenkin jo yhtä tiiviitä kuin kivitalot, joskin niiden hajonta on suurempi. Myös hirsitalot ovat kehittyneet tiiveydessä merkittävästi. Kivitalojen ilmanvuotoluvun q_{50} keskiarvo on pienentynyt noin 53 %, puutalojen 69 % ja hirsitalojen 67 %. (Vinha, 2009) (Vinha, 2005)

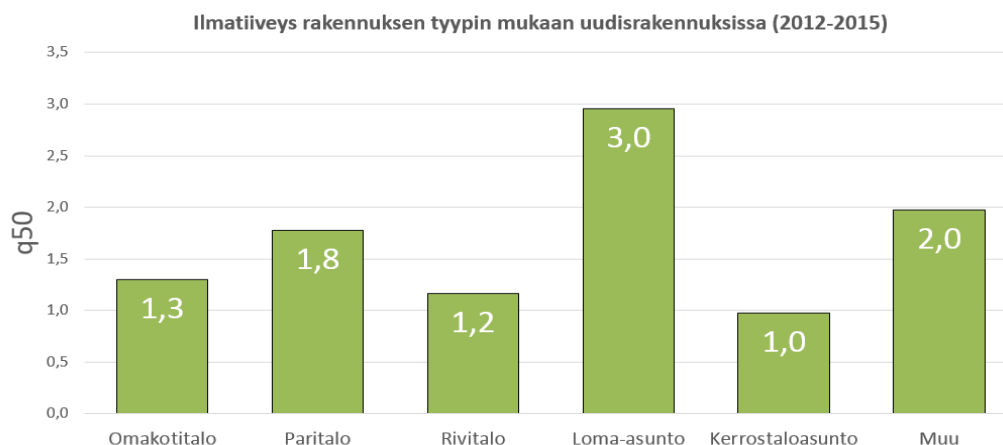
Rakennustutkimus RTS Oy:n Omakotirakentaja 2012/2013 ja 2013/2014 Rakennusvaiheen tutkimuksissa on saatu ilmanvuotolukujen keskiarvoiksi kivitaloille 1,7, puutaloille 1,5 ja hirsitaloille 2,2. Nämä tulokset ovat hieman suurempia kuin mitatuista kohteista saadut tulokset. (Rakennustutkimus RTS Oy, 2013) (Rakennustutkimus RTS Oy, 2014)



Kuva 30. Uusien pientalojen tiiveys kerroslukuun nähden. (n = 491 1-kerroksista, 125 1,5-kerroksista, 229 2-kerroksista, 30 2,5-kerroksista ja 17 3-kerroksista)

Ilmatiiveys heikkenee kerrosluvun kasvaessa, kuten nähdään kuvasta 30. Kerroslukuun on laskettu kellari ja maanpäälliset kerrokset yhteensä. Tiiveys heikkenee kerrosluvun kasvaessa. Se selittyy sillä, että esimerkiksi välipohja tulee lisäksi tiivistettäväksi ja muutenkin liitoksia tulee enemmän. Lisäksi 1,5-kerroksisissa taloissa on jostain syystä keskimäärin poikkeuksellisen suuri ilmanvuotoluku, kun vastaavasti 2,5-kerroksisissa taloissa ei ole havaittavissa vastaavaa poikkeusta. Itsessään 1,5-kerroksisten talojen heikompi tiiveys on helposti selitettävissä sillä, että näiden välipohjan tiivistysratkaisu on selvästi haastavampi kuin esimerkiksi kaksikerroksisissa.

Sauli Paloniityn kirjassa Rakennusten tiiviysmittaus esitellään myös kyselytulos pääasiassa henkilösertifioituilta tiiveysmittaajilta heidän mittauskohteistaan. Paloniityn keräämässä aineistossa q₅₀-lukujen keskiarvo 2010 jälkeen rakennetuille omakotitaloille on 1-kerroksisissa 0,9 ja 1,5–2-kerroksisissa 1,4. Nämä tulokset vastaavat hyvin mittaustuloksia 1,5-2-kerroksisissa, mutta poikkeavat hieman 1-kerroksisissa. (Paloniitty, 2012)



Kuva 31. Ilmatiiveys uudiskohteissa rakennuksen tyypin mukaan. (n = 769 omakotitaloa, 71 paritaloa, 41 rivitaloa, 17 loma-asuntoa, 152 kerrostaloasuntoa ja 24 muuta)

Rakennuksen ilmatiiveys vaihtelee myös rakennuksen tyypin mukaan, kuten nähdään kuvasta 31, jossa on esitetty ilmanvuotoluvun keskiarvo rakennuksen tyypin mukaan. Kerrostaloasuntojen tulokset ovat keskimäärin tiiveimpiä. Tämä voi ainakin osittain selittyä sillä, että kerrostaloasuntojen rakenteet ovat usein joka suuntaan betonia. Mitatuista kerrostaloasunnoista 72 % oli kivitaloja, loput puutaloja. Myös suuri osa vaipan pinta-alasta on kerrostaloasunnoissa sisäseinää. Loma-asunnoissa oli heikoimmat tulokset, mikä taas voi osittain selittyä siitä, että suuri osa niistä oli hirsitaloja (jopa 82 %). Loma-asuntoja ei ole myöskään välttämättä suunniteltu talvikäyttöön.

Ilmanpitävyyden on yhdessä aiemmassa tutkimuksessa todettu hieman heikkenevän talon valmistumisen jälkeen (Metiäinen, 1986). Tyypillisesti muutaman vuoden jälkeen tiiveysluku oli kasvanut noin 0–1,0 1/h (n₅₀). Asteikko n₅₀-luvussa vastaa suurin piirtein samaa kuin q₅₀-luvun asteikko pientaloissa. Tiiveyden heikentymisen oletettiin johtuvan muun muassa höyrynsulkujen liitosten, kuten teippien liimauksen, heikentymisestä. Puurakenteisissa taloissa tiiveyden heikentyminen oli merkittävämpää, minkä oletettiin johtuvan puun kuivumiskutistumisesta. Kovin uutta tutkimusta aiheesta ei kuitenkaan ole julkaistu, joten ilmanpitävyyden heikentymisestä talon valmistumisen jälkeen ei voida tällä hetkellä olla varmoja. (Metiäinen, 1986)

5. Ilmavuotokohtien paikannuksen kehitys ja mittaustuloksia

Ilmavuotokohtien paikannuksessa on käytetty pääsääntöisesti lämpökamerakuvausta ja käsin tunnustelua 50 pascalin alipaineessa. Vuotokohtien paikannus on tehty lähes jokaisessa tiiveysmittauskohteessa.

5.1. Vuotokohtien suuruusluokitus

Työssä laadittiin vuoden 2014 keväällä vuotokohdille uusi suuruusluokitus. Luokat perustuvat työn tekijän arvioon vuodoista ja niiden merkityksestä. Tässä tutkimuksessa vuotokohdat on jaettu neljään eri suuruusluokkaan: mitätön, pieni, kohtalainen ja suuri.

Taulukko 3. Suuruusluokkien vuotoilmamäärien määrittely q_{50} -vaikutuksen kautta.

Suuruusluokka	q_{50} vaikutus tyypillisessä omakotitalossa (vaippa 400 m ²)	Vuotoilmamäärä (m ³ /h)
Mitätön	0–0,03	0–10
Pieni	0,03–0,05	10–20
Kohtalainen	0,05–0,2	20–80
Suuri	0,2–	80–

Suuruusluokkiin on arvioitu niiden vuotoilmamäärä kuutiometreinä tunnissa 50 pascalin paine-erolla. Kun yksi vuotokohta suljetaan, kulkeutuu osa aiemmin tästä vuotokohdasta kulkeneesta ilmapirrasta toisten vuotokohtien kautta. Rakennukseen jäljelle jäävistä vuotokohdista kulkeutuu siis enemmän vuotoilmaa kuin aiemmin. Nettovaikutus on kuitenkin sellainen, että kokonaisilmamäärä pienenee. Suuruusluokissa onkin pyritty arvioimaan ainoastaan tämä nettovaikutus. Suuruusluokissa olevat ilmamäärät ovat mittaajaa ohjaavia lukuarvoja.

Yksittäisen vuotokohdan aiheuttamaa vuotoilmamäärää voidaan mitata tiiveysmittauksen yhteydessä mittaamalla kokonaisvuotoilmamäärää ennen ja jälkeen vuotokohdan sulkemista tai korjausta. Suuruusluokkien vuotoilmamäärät

on määritelty ilmanvuotoluvun q_{50} avulla tyypillisessä omakotitalossa (taulukko 3). Tarkoituksena on, että samanlainen vuoto luokitellaan samaan suuruusluokkaan riippumatta rakennuksen koosta (eli sama ilmamäärävaikutus). Vuotokohtien aiheuttamaa vuotoilmamäärää ei kuitenkaan tavallisesti mitata erikseen, vaan suuruuden arviointi perustuu lämpökuvaukseen, kädellä tunnusteluun ja määriteltyihin kuvauksiin vuotokohdista.

Luokka 0, mitätön

Mitättömän vuodon vaikutus on arviolta alle $4 \text{ m}^3/\text{h}$ 50 Pa paine-erolla (eli omakotitalossa ilmanvuotolukuun q_{50} vaikutus alle $0,01 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$). Hyvin pieni tai juuri ja juuri havaittava ilmavuoto. Ei välttämättä täyttä varmuutta onko kyseessä edes ilmavuoto. Vuodosta ei oteta kuvaa eikä sitä raportoida. Mikäli asiakas tai kirvesmies on mukana vuotokohtien paikannuksessa, voidaan vuodosta mainita. Jos vuotoa ei tunne 50 pascalin alipaineessa kunnolla, niin se tuskin vuotaa normaalitilanteessa juurikaan.

Esimerkkejä: ikkunan tiivisteestä nurkasta tuleva hyvin pieni vuoto, pieni niitinreikä ilmansulussa tai sälekaihtimen säädinnarun tulppaamaton reikä.

Luokka 1, pieni

Pienen vuodon vaikutus on arviolta $4\text{--}20 \text{ m}^3/\text{h}$ 50 Pa paine-erolla (eli omakotitalossa ilmanvuotolukuun q_{50} vaikutus $0,01\text{--}0,05 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$), mutta useammalla pienellä vuodolla on jo merkitystä. Ilmavuoto havaitaan epäilyksettä aistinvaraisesti tai merkkisavuilla, mutta se on voimakkuudeltaan pientä. Vuodon voi tuntea aistinvaraisesti ainoastaan hyvin läheltä (alle 10 cm). Vuotopaikka on pistemäinen tai hyvin pienikokoinen. Vuoto raportoidaan, mutta sen korjaaminen ei ole välttämätöntä.

Esimerkkejä: vähäinen ikkunan tai oven tiivistevuoto, pieni vuoto huonosti kiinnitetystä höyrynsulkuteipistä, tiivistämätön ikkunan tiivistemakkaran kulma, hirsitalon ulkonurkan hirsisalvoksista tuleva vuoto, pieni rako uretaanisaumassa, pieni sähkörasian kautta tuleva vuoto.

Luokka 2, kohtalainen

Kohtalaisen vuodon vaikutus on arviolta 20–60 m³/h 50 Pa paine-erolla (eli omakotitalossa ilmanvuotolukuun q₅₀ vaikutus 0,05–0,15 m³/m²h). Ilmavuoto on selkeästi aistinvaraisesti tuntuvaa ja vuotokohta yleensä helposti paikannettavissa. Vuodon havaitsee aistinvaraisesti jo 10–20 cm etäisyydeltä. Vuoto kuvataan ja raportoidaan ja sen korjausta suositellaan, mikäli se on järkevästi toteutettavissa. Voi heikentää asumismukavuutta tai aiheuttaa kosteusriskiä sijainnistaan riippuen.

Esimerkkejä: selkeä noin 1 cm halkaisijaltaan oleva aukko uretaanisaumassa, hirsitalossa ikkunan tai oven painumavaran alta tuleva vuoto, tulppaamattomasta sähköputkesta tuleva vuoto, sähkörasian kautta tuleva tuntuvampi vuoto, höyrynsulun teippaus irti yli 5 cm matkalta, teippaamaton ilmanvaihtokanavan läpivienti (kanavalle tehty kuitenkin oikean muotoinen ja kokoinen aukko höyrynsulkuun), savuhormin yläpohjan läpivienti, jossa höyrynsulku on teipattu kiinni rapattuun hormiin.

Luokka 3, suuri

Suuren vuodon vaikutus on arviolta yli 60 m³/h 50 Pa paine-erolla (eli omakotitalossa ilmanvuotolukuun q₅₀ vaikutus yli 0,15 m³/m²h). Voimakkaasti tuntuvaa ilmavuotoa ja vuotokohta on usein silminnähden suuri. Vedon tunteen saattaa tuntea jo huoneeseen tullessa tai sen tuntee jo etäämmältä esimerkiksi seistessä vuotokohdan alla. Vuoto kuvataan, raportoidaan ja sen korjaamista suositellaan ehdottomasti. Voi heikentää asumismukavuutta tai aiheuttaa kosteusriskiä sijainnistaan riippuen.

Esimerkkejä: kokonaan puuttuva ikkunan tai ovenkarmin saumaus runkoon, tiivistämätön ilmanvaihtokoneen kanavien höyrynsulun läpivienti, jossa aukko höyrynsulkuun on tehty X-muotoisena viiltana, kokonaan unohtunut teippaus yläpohjan höyrynsulussa.

Poikkeukset ja tarkennukset suuruusluokkiin

Ensisijaisesti noudatetaan vuotokuvauksissa olevia ilmavirtauksen määriä tai vaikutuksia ilmanvuotolukuun, joskin niiden arvioiminen on usein haastavaa, ja vasta seuraavaksi muita fyysisiä kuvauksia. Esimerkiksi riittävän suuri aukko voi suuren pinta-alansa vuoksi päästää paljonkin ilmaa lävitseen ilman, että se tuntuu voimakkaalta puhallukselta. Tällainen merkittäisiin siis esimerkiksi suureksi vuodoksi, vaikka ilman liike ei ole selkeästi havaittavissa. Vastaavasti hyvin pienikokoinen vuotokohta voi puhaltaa voimakkaasti (suuri virtausnopeus), mutta sen läpi virtaava ilmavirta on mitättömän pieni, jolloin se laskettaisiin pieneksi tai jopa mitättömäksi vuodoksi.

Rakenteen sisäiset vuodot voidaan joskus selvästi havaita lämpökameralla. Niiden suuruutta ei kuitenkaan pääse kokeilemaan rikkomatta rakenteita. Tällaisen vuodon suuruus arvioidaan sen epäilyistä ilmavirtauksen määrästä, kuten suuruusluokissa on mainittu.

5.2. Vuotojen tyyppiluokitus

Suuruusluokituksen lisäksi työssä laadittiin keväällä 2014 laajempi listaus vuotojen tyyppiluokista. Aiemmassa tyyppiluokituksessa oli vain 13 kohtaa: ikkunat, ovet, seinä-seinäliitokset, seinässä, alapohja-seinäliitokset, välipohja-seinäliitokset, yläpohja-seinäliitokset, yläpohjassa, sähköasennukset, ilmanvaihtoasennukset, savupiipun asennukset, vesi- tai viemärointiasennukset ja muut. Aiempi tyyppiluokitus havaittiin puutteelliseksi. Se vastasi jossain määrin kysymykseen mistä vuotaa, mutta ei kysymykseen miksi vuotaa. Tilastoinnin pohjalta ei pystynyt suoraan kertomaan syitä ilmapuodoille tai heikolle ilmanvuotoluvulle. Esimerkiksi vuoto ikkunasta saattoi tarkoittaa vuotoa ikkunan tiivisteestä tai ikkunan karmin ja seinän välistä. Tämän takia koettiin tarpeelliseksi laatia tässä työssä uusi tarkempi tyyppiluokitus.

Uuteen tyyppiluokitukseen laadittiin yhteensä 82 kohtaa, jotka on jaoteltu alakategorioihin. Uusi ehdotettava tyyppiluokitus tarkoittaa siis huomattavasti vuotokohtien lajittelua vuototyyppeihin. Lisäksi vuodot jaotellaan neljän

suuruusluokan mukaan, joista kolme tilastoidaan. Se tarkoittaa edelleen ilmavuotokohtien tilastointia.

Taulukko 4. Ikkunoiden vuototyypit.

Koodi	Vuototyyppi	Huomiot ja tarkennukset
I1	Ikkunan tiivisteestä ilmavuotoa. Ikkunan säätö puutteellinen tai tiiviste ei vastaa karmiin.	
I2	Ikkunan karmin ja seinän välisestä ureaanitiivistyksestä ilmavuotoa.	
I3	Ikkunan karmin ja seinän välisestä tiivistyksestä ilmavuotoa.	Sama kuin I2, mutta muu kuin ureaani
I4	Ikkunan karmin ja seinän välistä ilmavuotoa. Tiivistys puuttuu.	
I5	Ikkunan karmin ja seinän välistä vuotoa. Syy piilossa.	Vika ei varmuudella karmin ja seinän välisessä tiivisteessä.
I6	Ikkunan yläpuolisesta painumavarasta ilmavuotoa.	Hirsitalot
I7	Ikkunan yläpuolisesta painumavarasta ilmavuotoa. Tiivistys puuttuu.	Hirsitalot
I8	Ilmavuotoa sälekaihtimen säätimen läpivientiaukosta.	
I9	Ilmavuotoa ikkunan korvausilmaventtiilistä, vaikka se on suljettu ja tiivistetty.	
I10	Ikkunan karmista ilmavuotoa.	
I11	Ikkunan puitteista ilmavuotoa.	
I12	Ikkunan yli menevän höyrynsulun viillosta ilmavuotoa. Varsinainen vuotopaikka epäselvä.	Rakennusaikana höyrynsulku vielä ikkunan päällä. Höyrynsulkuun viilletään reikä mittausta varten.

Taulukko 5. Ovien vuototyypit.

Koodi	Vuototyyppi	Huomiot ja tarkennukset
O1	Oven tiivisteestä ilmavuotoa.	
O2	Oven tiivisteestä ilmavuotoa. Oven säätö puutteellinen.	Sama kuin O1, mutta selvästi korjattavissa säätämällä
O3	Oven tiivisteestä ilmavuotoa. Ovi on käyrä.	Sama kuin O1 tai O2, mutta selvästi ei korjattavissa säätämällä, vaan ovi tai karmi on käyrä
O4	Ilmavuotoa kynnyksen alta.	
O5	Ilmavuotoa kynnyksen alta. Tiivistys puuttuu	
O6	Oven karmin ja seinän välisestä tiivistyksestä ilmavuotoa.	
O7	Oven karmin ja seinän välistä ilmavuotoa. Tiivistys puuttuu.	
O8	Oven karmin ja seinän välistä ilmavuotoa. Syy piilossa.	Vika ei varmuudella karmin ja seinän välisessä tiivisteessä.
O9	Ilmavuotoa oven painumavarasta tiivistyksestä.	Hirsitalot
O10	Ilmavuotoa oven painumavarasta. Tiivistys puuttuu.	Hirsitalot
O11	Oven karmista ilmavuotoa.	
O12	Oven puitteista (eli ovesta itsestään) ilmavuotoa.	

Taulukko 6. Seinän vuototyypit.

Koodi	Vuototyyppi	Huomiot ja tarkennukset
S1	Höyrynsulkumuovin sauman teippauksesta ilmavuotoa.	
S2	Höyrynsulkumuovissa olevasta reiästä ilmavuotoa.	
S3	Ilmansulkupaperin sauman teippauksesta ilmavuotoa.	
S4	Ilmansulkupaperissa olevasta reiästä ilmavuotoa.	
S5	Uretaanilevyjen välisestä tiivistyksestä ilmavuotoa.	
S6	Hirsien välisestä liitoksesta ilmavuotoa.	
S7	Harkkoseinän tasoituksesta ilmavuotoa.	
S8	Seinästä ilmavuotoa. Vuotopaikka piilossa, ei näe tarkemmin.	
S9	Ilmavuotoa ulkoseinän läpi menevän kannatinpalkin tyveltä.	
S10	Ilmavuotoa hirsikehikon kiristyspultin aukosta.	
S11	Ulkoseinän ja väliseinän liitoskohdasta ilmavuotoa	
S12	Ilmavuotoa seinässä olevan tarkastusluukun alta (esim. putkikotelointi)	
S13	Ikkunan tai oven kohdalla ilmavuotoa seinästä (esim. puiden välistä)	Vika ei karmissa tai karmin ja seinän välissä, vaan selkeästi seinässä

Taulukko 7. Seinä-alapohjaliitoksen vuototyypit.

Koodi	Vuototyyppi	Huomiot ja tarkennukset
SA1	Seinän ja alapohjan välisestä tiivistyksestä ilmavuotoa.	
SA2	Seinän ja alapohjan liitoksesta ilmavuotoa. Vuotopaikka piilossa, ei näe tarkemmin.	Vika ei varmuudella seinän ja alapohjan välisessä tiivistyksessä. Vuoto voi tulla esim. kipsilevyn takaa ja itse vuotokohta seinässä
SA3	Oven kynnyksen ilmansulusta ilmavuotoa.	Vertaa O4 tai O5. Tässä vika on selvästi enemmän alapohjassa näkyvässä höyrynsulkuosassa. Vika voi myös olla esimerkiksi sisäoven kynnyksessä olevassa radonkaistaleessa.

Taulukko 8. Seinä-yläpohjaliitoksen vuototyypit.

Koodi	Vuototyyppi	Huomiot ja tarkennukset
SY1	Seinän ja yläpohjan välisestä tiivistyksestä ilmavuotoa.	
SY2	Seinän ja yläpohjan välisestä liitoksesta ilmavuotoa. Vuotopaikka piilossa, ei näe tarkemmin.	Vika ei varmuudella seinän ja yläpohjan välisessä tiivistyksessä. Vuoto voi tulla esim. kipsilevyn takaa ja itse vuotokohta seinässä tai yläpohjassa.

Taulukko 9. Seinä-väliopohjaliitoksen vuototyypit.

Koodi	Vuototyyppi	Huomiot ja tarkennukset
SV1	Seinän ja väliopohjan välisestä tiivistyksestä ilmavuotoa.	
SV2	Ilmavuotoa seinän ja väliopohjan liitoksesta. Vuotopaikka piilossa, ei näe tarkemmin.	Vika ei varmuudella seinän ja väliopohjan välisessä tiivistyksessä. Vuoto voi tulla esim. kipsilevyn takaa ja itse vuotokohta seinässä.
SV3	Ilmansulun tiivistyksestä väliopohjan vasoihin ilmavuotoa.	

Taulukko 10. Ulkoseinä-ulkoseinäliitoksen vuototyypit.

Koodi	Vuototyyppi	Huomiot ja tarkennukset
SS1	Kahden ulkoseinän liitoksesta ilmavuotoa.	
SS2	Kahden ulkoseinän liitoksesta ilmavuotoa. Syy piilossa, ei näe tarkemmin.	Vika ei varmuudella seinä-seinäliitoksessa. Vuoto voi tulla esim. kipsilevyn takaa ja itse vuotokohta seinässä.

Taulukko 11. Yläpohjan vuototyypit.

Koodi	Vuototyyppi	Huomiot ja tarkennukset
YP1	Höyrynsulkumuovin sauman teippauksesta ilmavuotoa.	
YP2	Höyrynsulkumuovissa olevasta reiästä ilmavuotoa.	
YP3	Ilmansulkupaperin sauman teippauksesta ilmavuotoa.	
YP4	Ilmansulkupaperissa olevasta reiästä ilmavuotoa.	
YP5	Uretaanilevyjen välisestä tiivistyksestä ilmavuotoa.	
YP6	Uretaanilevyssä olevasta reiästä ilmavuotoa.	
YP7	Ullakon luukun tiivisteestä ilmavuotoa.	
YP8	Tarkastus- tai muusta luukusta ilmavuotoa.	
YP9	Alaslaskun takaa ilmavuotoa. Syy piilossa, ei näe tarkemmin.	
YP10	Sisäkatossa olevasta aukosta ilmavuotoa. Syy piilossa, ei näe tarkemmin.	
YP11	Luukun tiivistyksestä yläpohjaan ilmavuotoa.	Vertaa YP7 tai YP8. Vika ei tässä tapauksessa itse luukun tiivisteessä.

Taulukko 12. Ilmanvaihdon ja muiden putkien vuototyypit.

Koodi	Vuototyyppi	Huomiot ja tarkennukset
IV1	IV-kanavan tai muun putken läpivientikauluksen asennuksesta ilmavuotoa.	
IV2	IV-kanavan tai muun putken vain teippaamalla tiivistettävän putken läpiviennin teippauksessa ilmavuotoa.	
IV3	Raitisilmakanavan läpiviennistä ilmavuotoa.	Ulkoilmakanavan läpivienti
IV4	IV-kanavan tai muun putken läpiviennistä ilmavuotoa. Vuotopaikka on piilossa, ei näe tarkemmin.	Vika ei varmuudella itse tiivistyksessä. Voi olla esim. levytetty katto, jolloin vuoto voi olla yläpohjan höyrynsulussa.
IV5	IV-koneen yläpuolelta ilmavuotoa.	
IV6	IV-koneen kiinnityslevyn tiivistyksestä ilmavuotoa.	
IV7	Ilmavuotoa IV-koneen suljettavan kannen tiivisteestä.	
IV8	Ilmavuotoa ilmalämpöpumpun johtoläpiviennistä	
IV9	Ilmavuotoa ilmanvaihtokanavasta, vaikka ulko- ja jäteilma on suljettu.	Todennäköisesti itse kanavisto vuotaa tässä tapauksessa.
IV10	Ilmavuotoa keskuspolynimurin poistoputken läpiviennistä.	
IV11	IV-kanavan tai muun putken läpiviennistä ilmavuotoa.	

Taulukko 13. Hormien vuototyypit.

Koodi	Vuototyyppi	Huomiot ja tarkennukset
H1	Hormin tiivistyksestä yläpohjaan ilmavuotoa.	
H2	Hormin tasoituksesta ilmavuotoa.	
H3	Hormista ilmavuotoa, tasoitus puuttuu.	

Taulukko 14. Sähköasennusten vuototyypit.

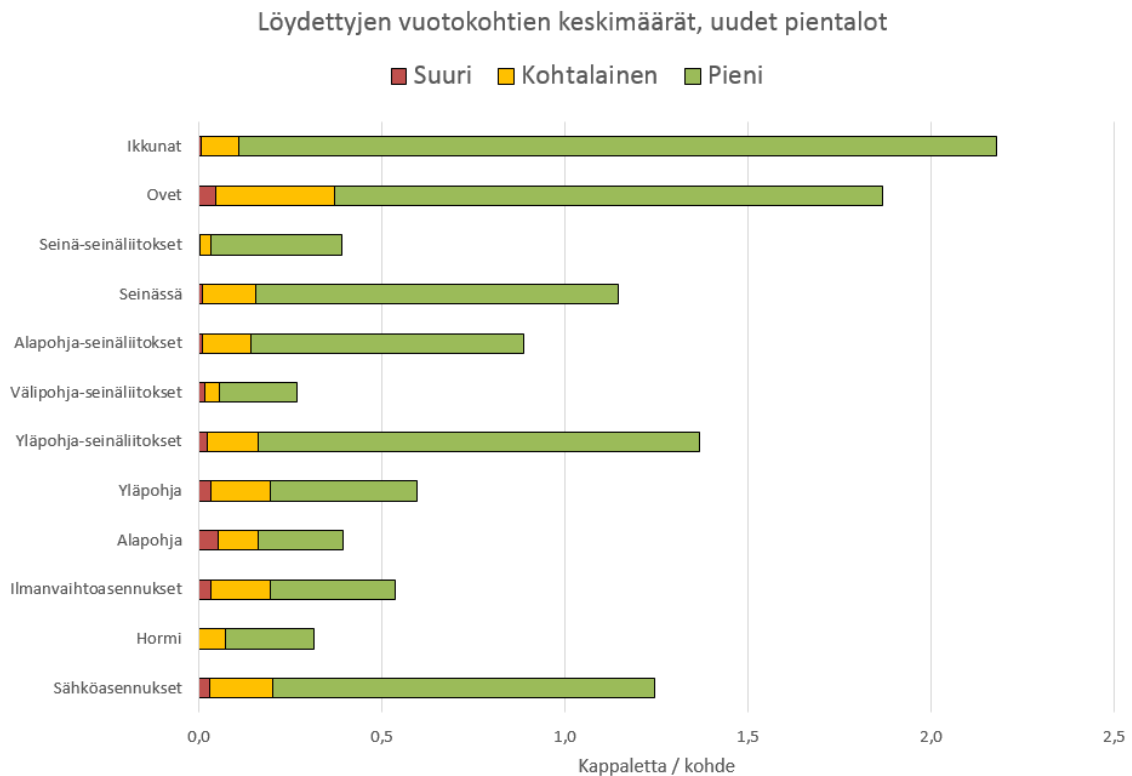
Koodi	Vuototyyppi	Huomiot ja tarkennukset
SÄ1	Sähköjohdon läpivientiputkesta ilmavuotoa.	
SÄ2	Sähköjohdon läpivientiputken teippauksesta höyrynsulkumuoviin ilmavuotoa	
SÄ3	Sähköjohdon läpiviennin uretaanitiivistyksestä ilmavuotoa.	
SÄ4	Sähköjohdon läpiviennin puuttuvasta tiivistyksestä ilmavuotoa	
SÄ5	Ilmavuotoa sähköläpiviennistä. Vuotopaikka on piilossa, ei näe tarkemmin.	
SÄ6	Ilmavuotoa sähkökeskuksen kautta	

Taulukko 15. Alapohjan vuototyypit.

Koodi	Vuototyyppi	Huomiot ja tarkennukset
A1	Ilmavuotoa alapohjan putkiläpiviennistä	
A2	Ilmavuotoa alapohjan suojaputken kautta	
A3	Ilmavuotoa teknisen tilan tiivistyskannesta	
A4	Ilmavuotoa alapohjassa olevasta reiästä	

5.3. Mittaustuloksia uudesta ilmavuotokohtatutkimuksesta

Tässä työssä laadittu uusi vuotokohtatilastointi aloitettiin keväällä 2014. Kohteet on mitattu 8.4.2014 – 23.1.2015. Otos on 372 uutta rakenteilla olevaa pientaloa. Myös muita kuin uusia pientaloja on tilastoitu uudella menetelmällä, mutta niiden otos on pienempi, eikä niihin keskitytä tässä työssä. Vuotokohdista on syytä huomata, että ne on tilastoitu ennen kuin ilmanvuotoluku on määritetty. Yleensä mittauksessa on paikalla asiakas tai kirvesmies, joka korjaa ainakin löydettyt suuret ja kohtalaiset vuodot vielä ennen varsinaista tiiveysmittausta. Tätä korjausta ei enää tilastoida, vaan vuoto otetaan tilastoon sellaisena kuin se on vuotokohtien paikannuksessa havaittu. Kaikkia vuototyyppejä ei tietenkään pysty korjaamaan niin nopeasti, jotta se voitaisiin korjata vielä ennen mittausta, mutta esimerkiksi oven säätö tai höyrynsulkumuovin teippaus ovat korjauksia, jotka on vielä helppo tehdä ennen mittausta.



Kuva 32. Löydetyt vuotokohdat pääkategorioittain. Uudet rakenteilla olevat pientalot. (n = 372 uutta pientaloa)

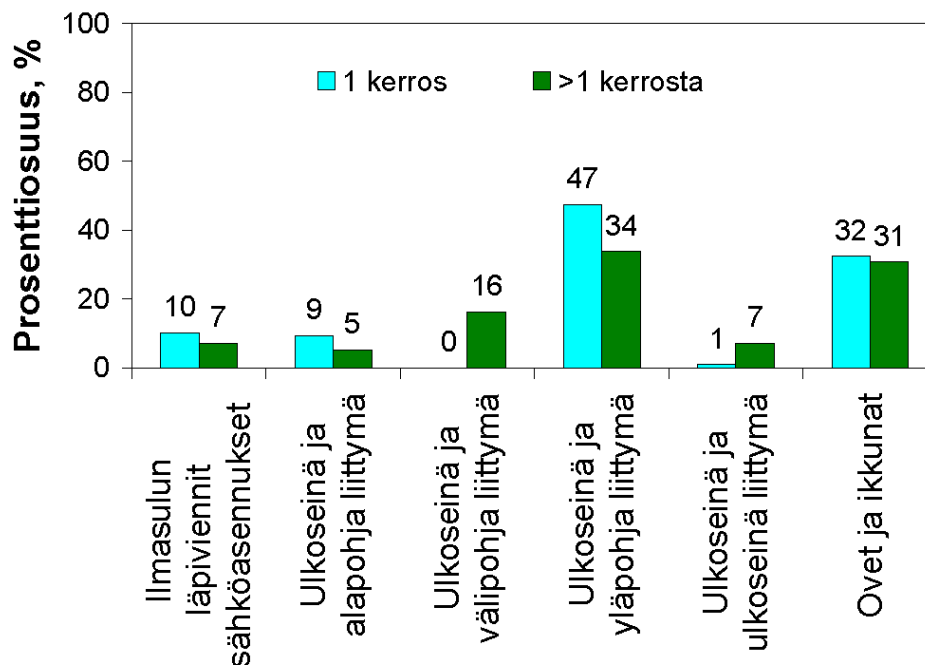
Kuvassa 32 on esitelty löydetty vuotokohdat pääkategorioiden mukaan ja suuruusluokkiin jaoteltuna. Jos kaikki suuruusluokat huomioidaan, on viisi suurinta kategoriaa suuruusjärjestyksessä:

1. Ikkunat (2,18 kpl / kohde)
2. Ovet (1,87)
3. Yläpohja-seinäliitokset (1,37)
4. Sähköasennukset (1,24)
5. Seinässä olevat vuodot (1,15)

Jos kuitenkin jätetään pienet vuodot huomioimatta ja lasketaan ainoastaan kohtalaiset ja suuret vuodot, ovat suurimmat seitsemän kategorian suuruusjärjestyksessä:

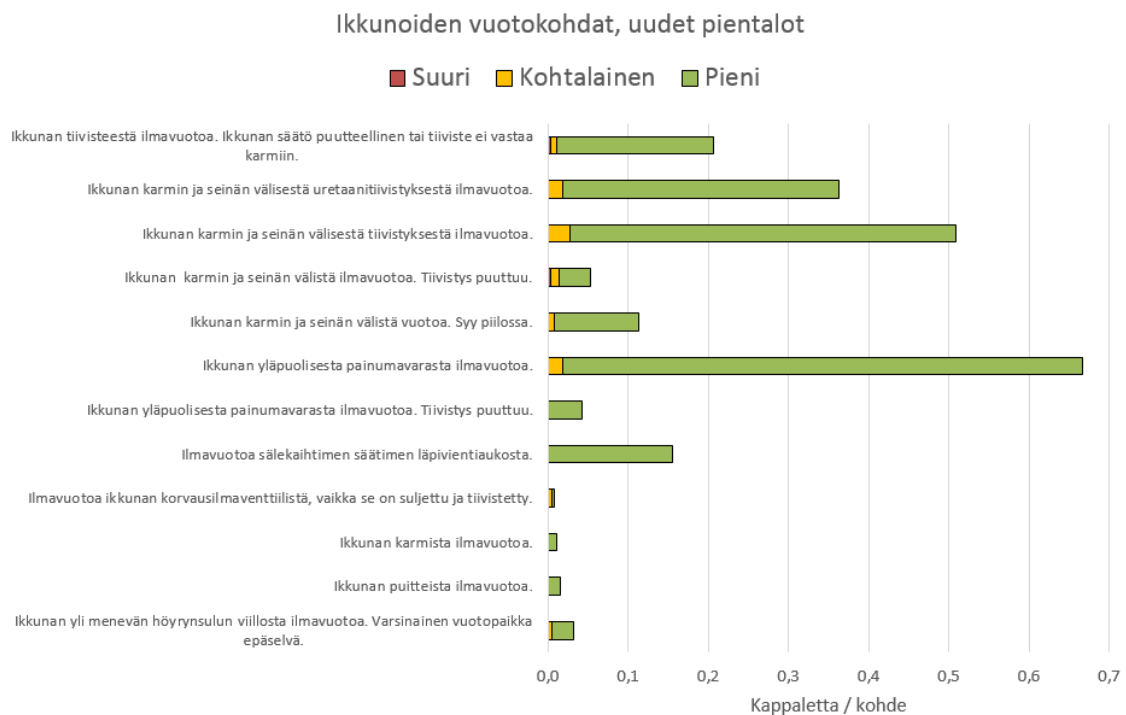
1. Ovet (0,37 suurta tai kohtalaista vuotoa / kohde)
2. Sähköasennukset (0,20)
3. Yläpohja (0,20)
4. Ilmanvaihtoasennukset (0,19)
5. Alapohja (0,16)
6. Yläpohja-seinäliitokset (0,16)
7. Seinässä olevat vuodot (0,16)

Yhteensä vuotoja havaittiin keskimäärin 11,2 kappaletta per kohde mitatuissa uusissa pientaloasunnoissa. Näistä suuria vuotoja oli keskimäärin 0,3 kpl/kohde, kohtalaisia 1,6 kpl/kohde ja pieniä 9,3 kpl/kohde.



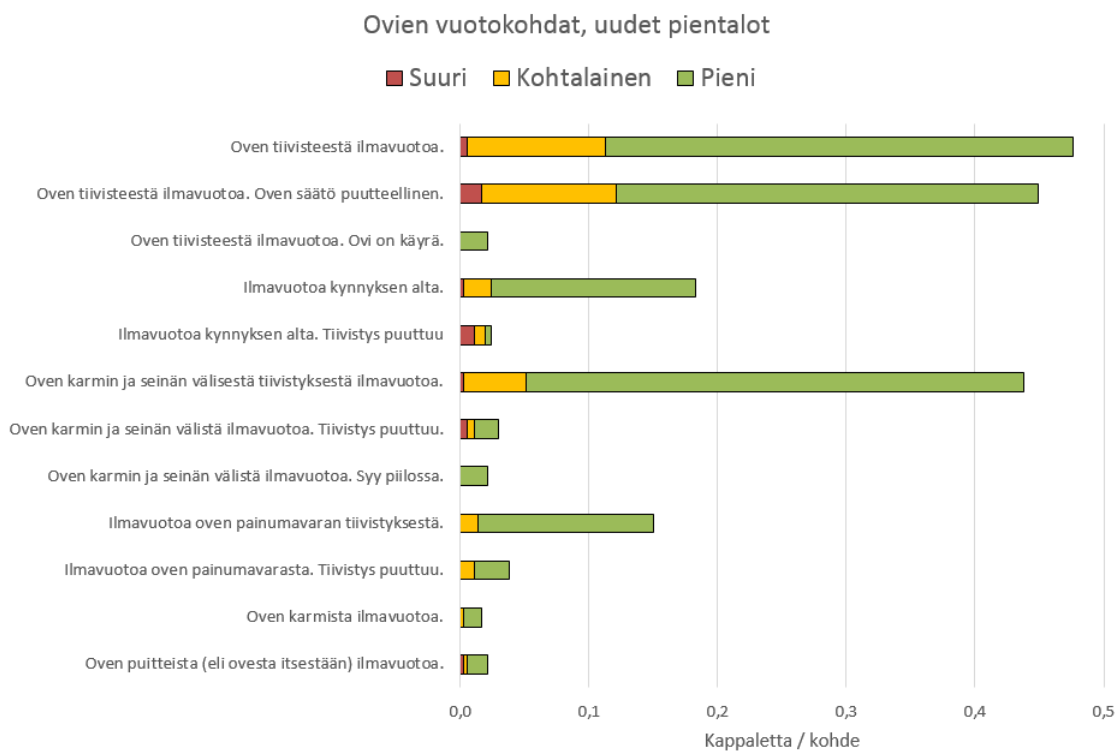
Kuva 33. Ilmavuotokohdat vanhoissa pientaloissa. (Vinha, 2009)

Vertailun vuoksi kuvassa 33 esitetään aiempia tutkimustuloksia olemassa olevista pientaloista. Vinha et al. (2009) toteavat, että yleisin ilmapuotokohta olemassa olevissa pientaloissa on yläpohjan ja ulkoseinän liitoskohta. Seuraavaksi eniten ilmapuotoja löytyy ovista ja ikkunoista. Lisäksi puotoja löytyy tyypillisesti ilmansulun läpivienneistä ja sähköasennuksista, ulkoseinä-alapohja-, ulkoseinä-väliopohja- ja ulkoseinä-ulkoseinäliittymistä. Uudet tulokset vahvistavat muun muassa kokemukseen perustuvan havainnon, että ikkunoissa olevat puodot ovat pääasiassa pieniä puotoja. Ikkunoiden merkitys heikon ilmatiiveyden aiheuttajana on siis todennäköisesti pienempi kuin voisi aiempien tutkimusten mukaan päätellä. Sama pätee alapohja-seinä- ja yläpohja-seinäliitoksiin. Osin merkittävätkin erot aiempaan tutkimukseen nähden johtuvat todennäköisesti tilastointitavoista, rakennusten iästä sekä niiden valmiusasteesta mittaushetkellä. Täysin valmiista talosta on esimerkiksi vaikeampi löytää yläpohjan puotoja, kun katto on jo levytetty. Tällöin puodot yläpohjassa siirtyvät levyjen takana erilaisiin läpivientikohtiin (aukot levytyksessä) sekä etenkin yläpohjan ja seinän liitoskohtaan, jolloin ne tilastoidaan helposti muihin kategorioihin kuin yläpohjaan. Tämä on todennäköisesti johtanut aiemmassa tutkimuksessa havaittuun suureen määrään seinän ja yläpohjan liitoskohtien puotoja. (Vinha, 2009)



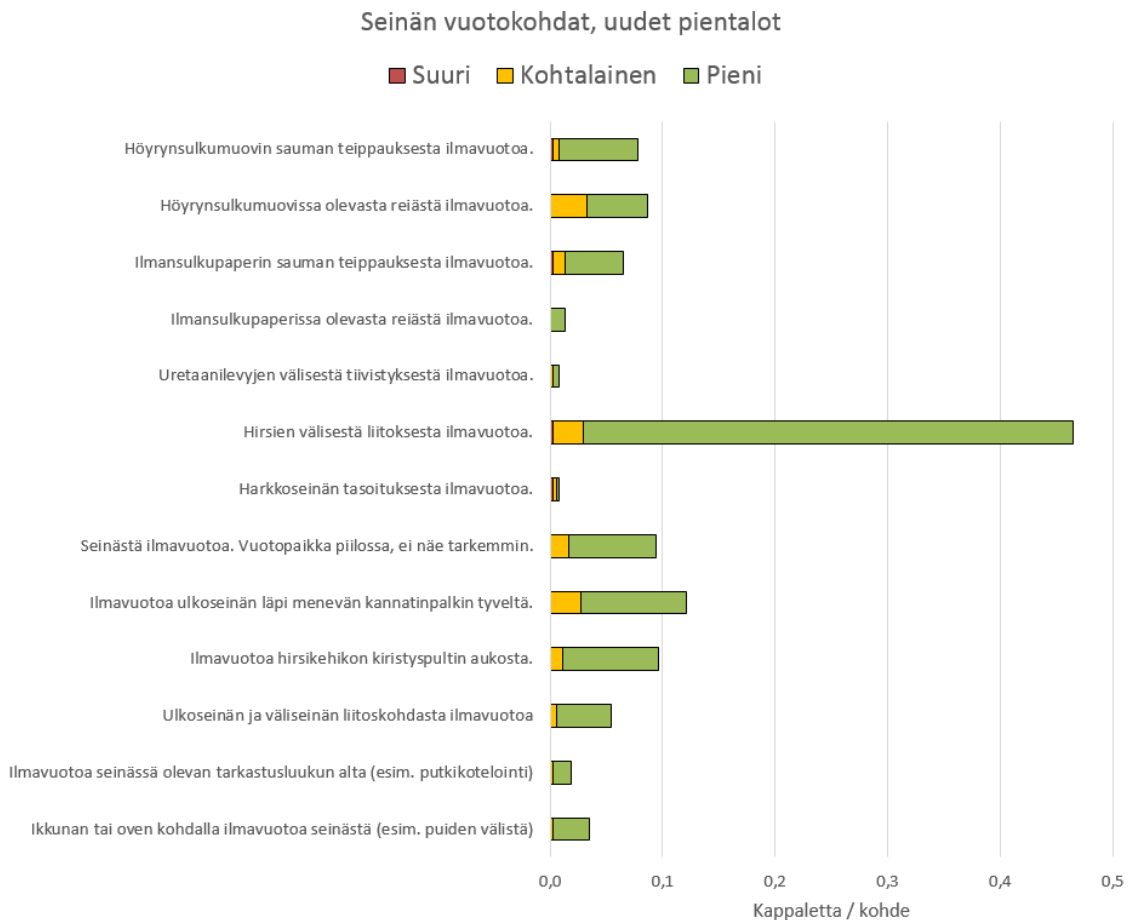
Kuva 34. Ikkunoiden vuotokohdat.

Kuvasta 34 havaitaan, että kohtalaisia vuotoja ikkunoissa on havaittu melko tasaisesti pääasiassa tiivisteestä, karmin ja seinän välistä sekä hirsitaloissa painumavarasta. Pienet vuodot mukaan lukien eniten ikkunavuotoja on ollut painumavaroissa (0,67 kpl / kohde), karmin ja seinän välisessä tiivistyksessä (0,51), karmin ja seinän välisessä uretaanitiivistyksessä (0,36), ikkunan tiivisteestä (0,21) ja sälekaihtimen säätimen läpivientiaukossa (0,16)



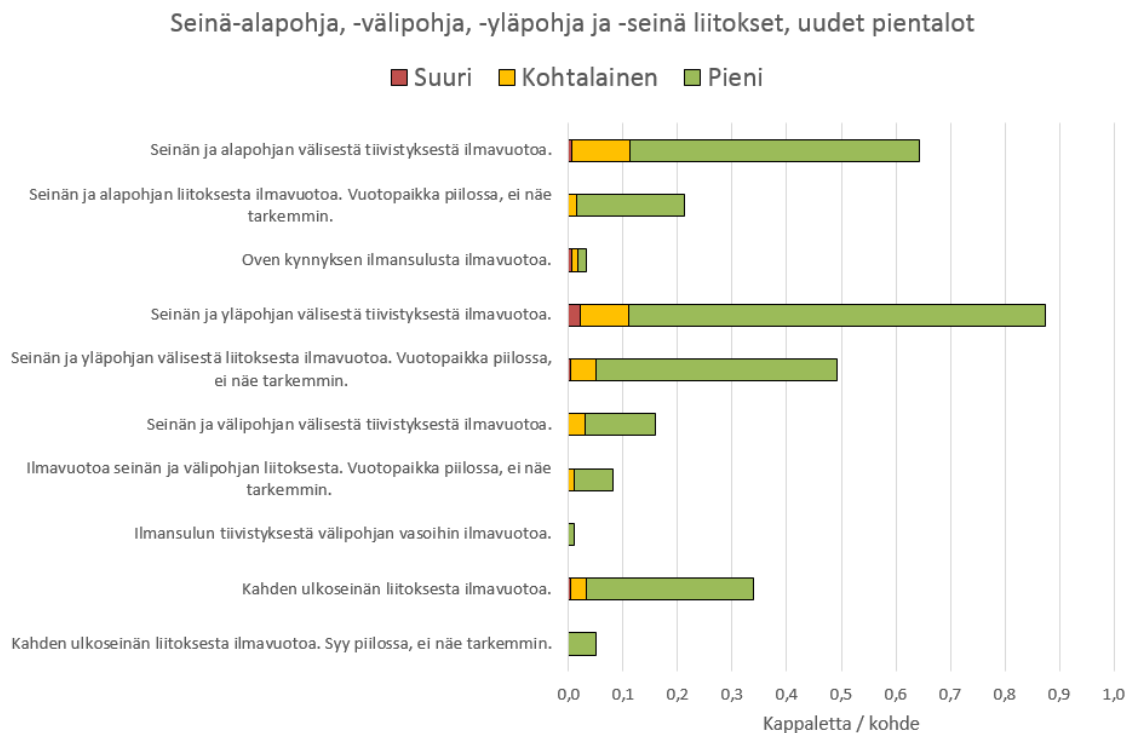
Kuva 35. Oven vuotokohdat.

Kuvassa 35 on esitetty ovien vuotokohdat. Eniten vuotoja on tullut oven tiivisteestä (0,48 kpl / kohde), oven tiivisteestä säädön ollessa puutteellinen (0,45), karmin ja seinän välisestä tiivistyksestä (0,44), kynnyksen alta (0,18) ja painumavaran tiivistyksestä (0,15). Myös jos katsotaan vain kohtalaisia ja suuria vuotoja, on oven tiiviste selvästi yleisin syy vuodoille. Harvemmin oven tiivistevuoto on johtunut selkeästi käyrästä ovesta (0,02).



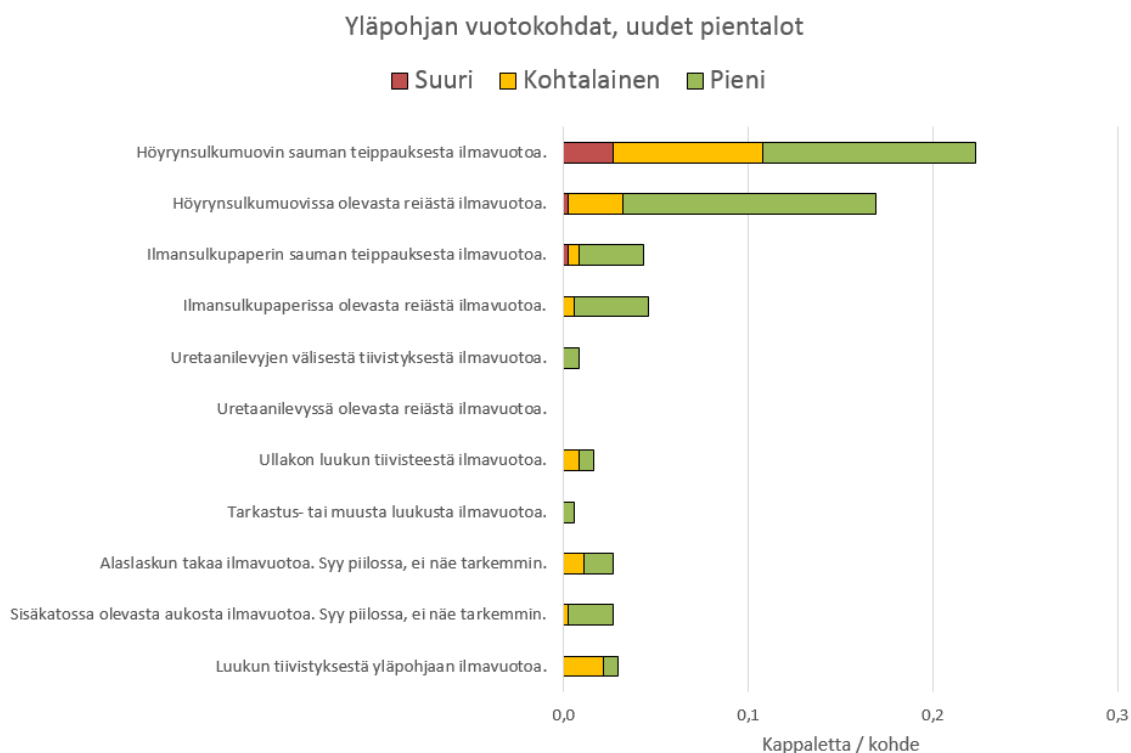
Kuva 36. Seinän vuotokohdat.

Seinän vuodot on esitetty kuvassa 36. Vuotoja on tullut eniten hirsien välisestä liitoksesta (0,47 kpl / kohde), kannatinpalkin tyveltä (0,12), hirsikehikon kiristyspultin aukosta (0,10), seinästä varsinaisen vuotopaikan ollessa piilossa (0,09), höyrynsulkumuovissa olevasta reiästä (0,09), höyrynsulkumuovin sauman teippauksesta (0,08) ja ilmansulkupaperin sauman teippauksesta (0,06). Vuotomääriä ei ole suhteutettu tutkimuksessa ilmansulkutyypin markkinaosuuksien mukaan, joten esimerkiksi uretaanilevyjen välisestä tiivistyksestä on vuotanut harvoin (0,01 kpl / kohde), sillä uretaanilevy on myös harvinainen ilmansulkutyyppejä.



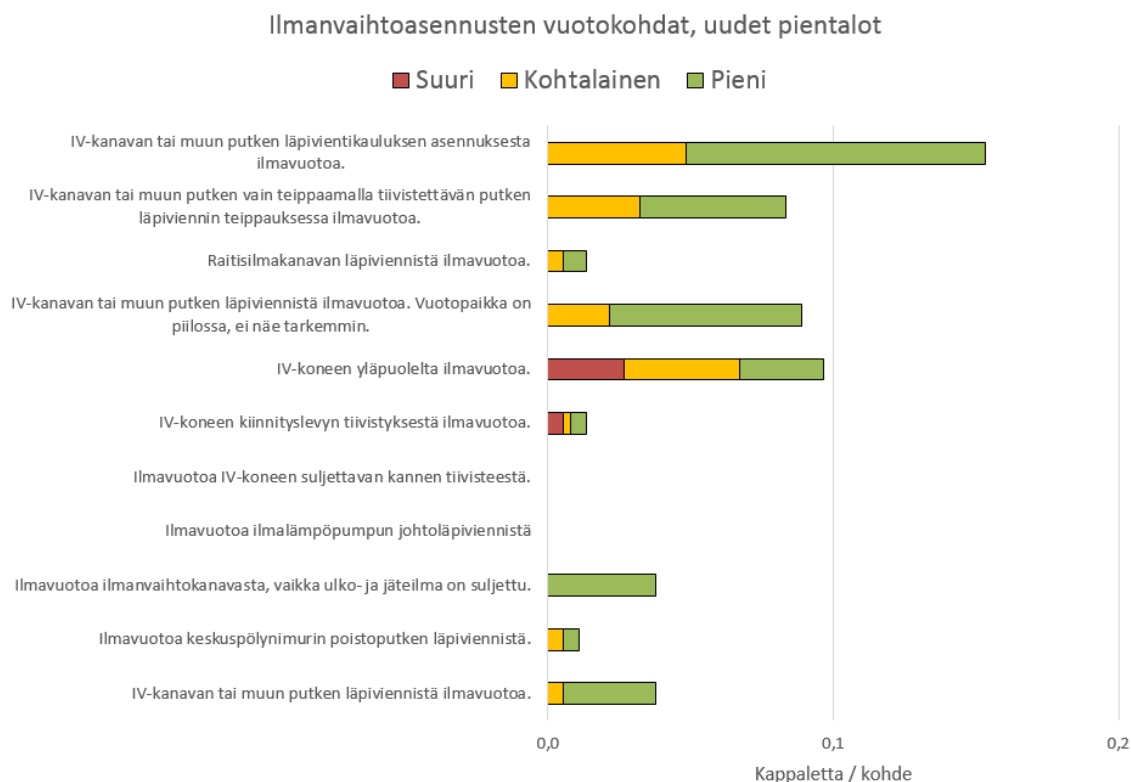
Kuva 37. Seinä-alapohja, -välipohja, -yläpohja ja -seinä liitosten vuotokohdat.

Kuvassa 37 on esitetty vuotokohdat seinän liitoksista alapohjaan, välipohjaan, yläpohjaan ja toiseen seinään. Eniten vuotoja on havaittu seinän ja yläpohjan välisestä tiivistyksestä (0,87 kpl / kohde), seinän ja alapohjan välisestä tiivistyksestä (0,64), seinän ja yläpohjan välisestä liitoksesta varsinaisen vuotopaikan ollessa piilossa (0,49) ja kahden ulkoseinän liitoksesta (0,34).



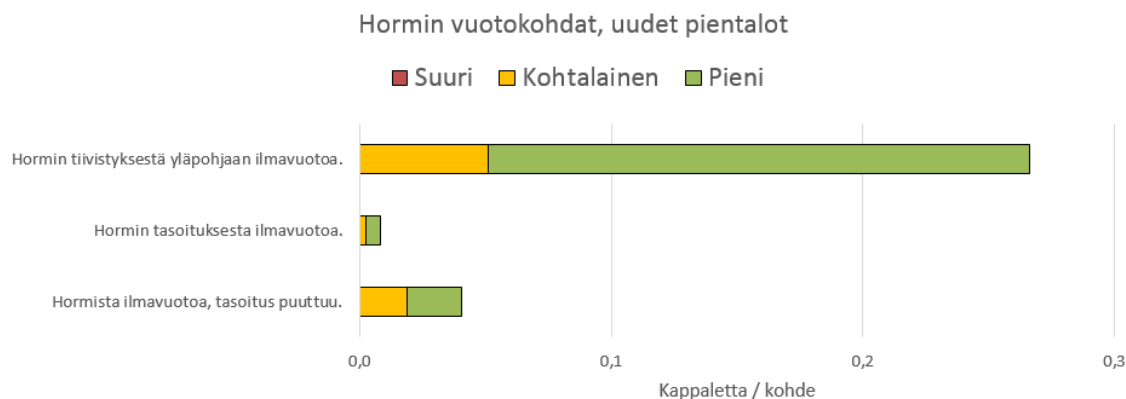
Kuva 38. Yläpohjan vuotokohdat.

Kuvasta 38 havaitaan yläpohjan vuodot. Selvästi eniten vuotoja on tullut höyrynsulkumuovin sauman teippauksesta (0,22 kpl / kohde) sekä höyrynsulkumuovissa olevasta reiästä (0,17). Niistä on myös tulleet merkittävimmät vuodot, eli suuret ja kohtalaiset vuodot. Sauman teippauksen vuoto on ollut näistä kahdesta selvästi yleisempi kohtalaisten ja suurten vuotojen osalta. Seuraavaksi yleisimpiä vuotokohtia ovat olleet ilmansulkupaperissa oleva reikä (0,05), ilmansulkupaperin sauman teippaus (0,04), sisäkatossa oleva aukko varsinaisen syyn ollessa piilossa (0,03), luukun tiivistyksestä yläpohjaan (0,03) ja alaslaskun takaa varsinaisen syyn ollessa piilossa (0,03). Samoin, kuten seinän vuotokohdissa, vuotokohtien määrää ei ole suhteutettu ilmansulkutyypin markkinaosuuksiin, vaan mitattujen kohteiden määrään. Ei voida siis sanoa onko ilmansulkupaperi vai höyrynsulkumuovi vuotanut yleisemmin.



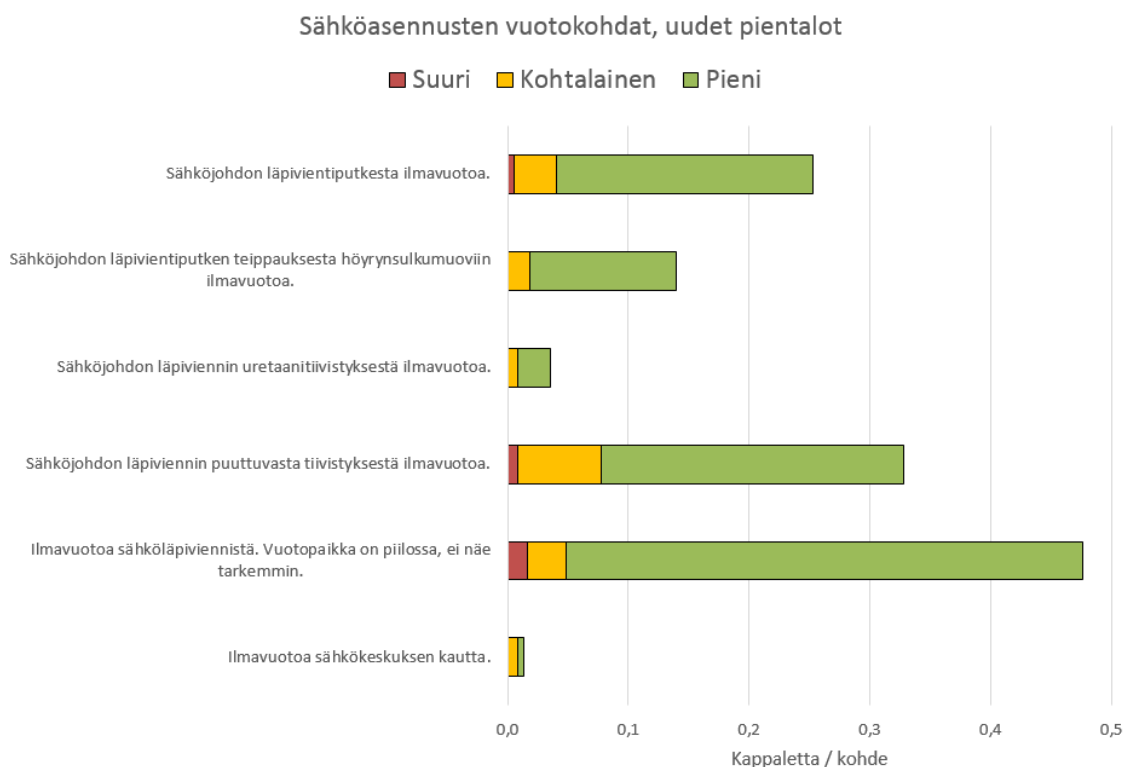
Kuva 39. Ilmanvaihtoasennusten vuotokohdat.

Kuvassa 39 on esitetty ilmanvaihtoasennusten (tai muiden läpivientiputkien) vuotokohdat. Eniten ilmanvaihtoasennusten vuotokohdista on tullut läpivientikauluksen asennuksesta (0,15 kpl / kohde), ilmanvaihtokoneen yläpuolelta (0,10), läpiviennistä varsinaisen vuodon ollessa piilossa (0,09) ja teippaamalla tiivistettävän putken läpiviennistä (0,08). Näistä kohdista on tullut myös eniten merkittäviä vuotoja, eli kohtalaisia ja suuria vuotoja.



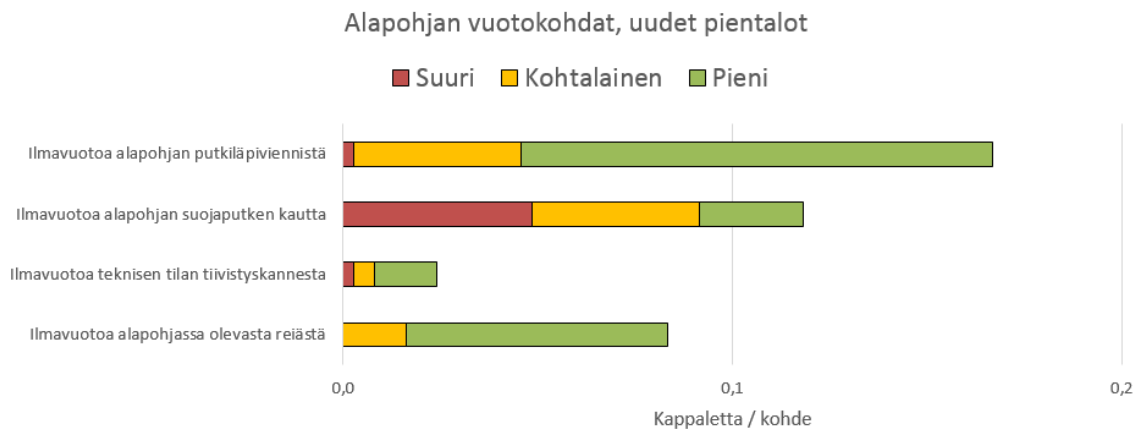
Kuva 40. Hormin vuotokohdat.

Kuvasta 40 havaitaan, että hormin vuotokohdista eniten tulee hormin tiivistyksestä yläpohjaan (0,27 kpl / kohde) sekä hormista tasoituksen puuttuessa (0,04). Merkittävistä vuodoista, eli kohtalaisista ja suurista vuodoista, suurin osa on tullut myös hormin tiivistyksestä yläpohjaan.



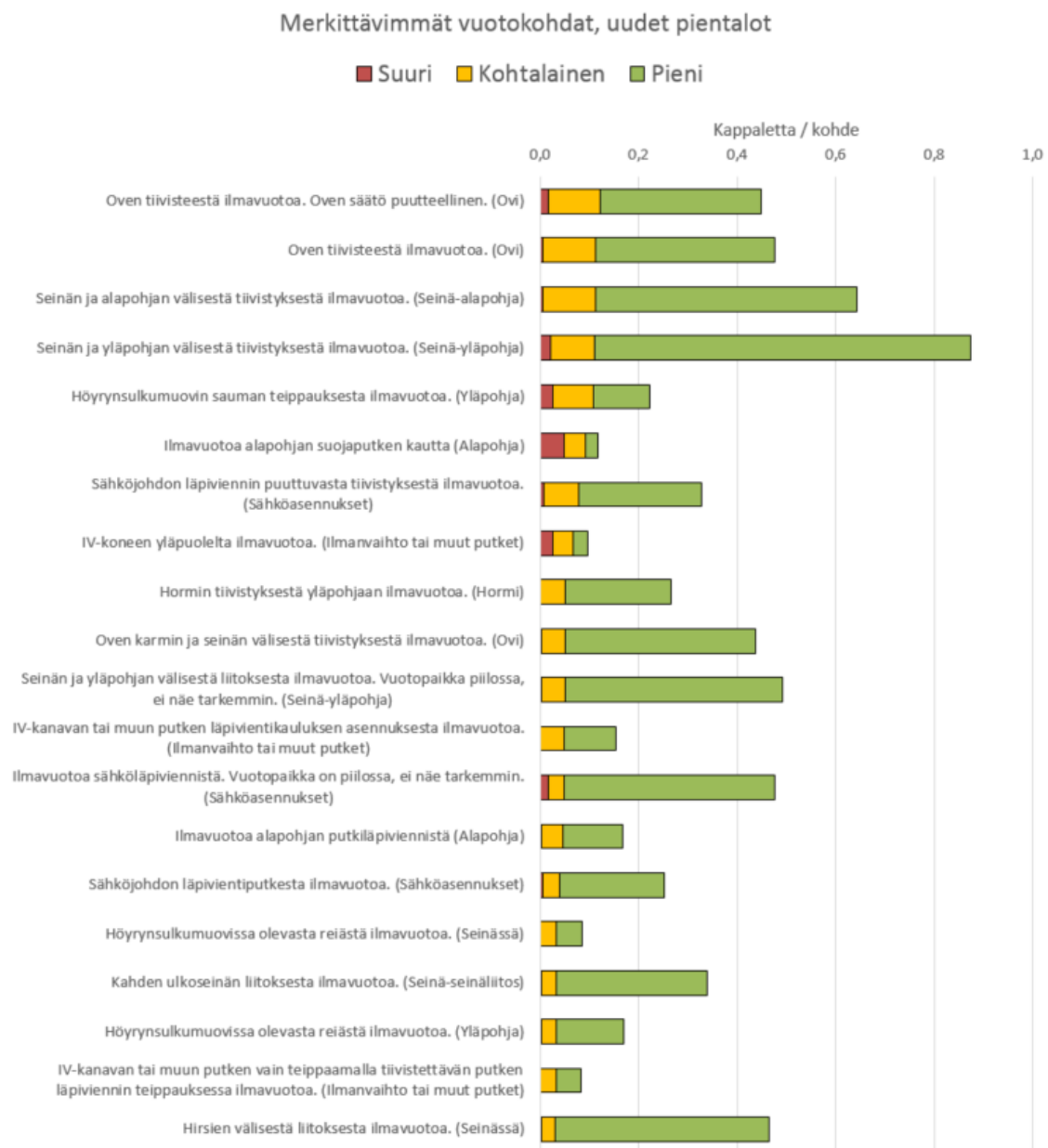
Kuva 41. Sähköasennusten vuotokohdat.

Kuvasta 41 nähdään sähköasennusten vuotokohdat. Eniten vuotoja on tullut sähköläpiviennistä varsinaisen vuotopaikan ollessa piilossa (0,48 kpl / kohde), sähköjohdon läpiviennin puuttuvasta tiivistyksestä (0,33), sähköjohdon läpivientiputkesta (0,25) ja läpivientiputken teippauksesta höyrynsulkumuoviin (0,14). Näistä on tullut myös suurin osa merkittävistä vuodoista, eli kohtalaisista ja suurista vuodoista.



Kuva 42. Alapohjan vuotokohdat.

Kuvasta 42 havaitaan, että alapohjan vuodoista suurin osa on tullut alapohjan putkiläpiviennistä (0,17 kpl / kohde), suoja-putken kautta (0,12), alapohjassa olevasta reiästä (0,08) ja viimeisenä teknisen tilan tiivistyskannesta (0,02). Suurista ja kohtalaisista vuodoista eniten on tullut alapohjan suoja-putken kautta. Lähes puolet suoja-putken vuodoista ovatkin olleet suuria vuotoja. Etenkin suoja-putken tapauksessa on huomattava, että ne ovat usein tahallaan mittaussvaiheessa vielä tiivistämättä. Ne teipataankin tai tiivistetään tilapäisesti jollain muulla keinolla ennen varsinaista tiiveysmittausta. Ne on kuitenkin tilastoitu ennen kuin niitä on korjattu. Suoja-putki tiivistetään yleensä vasta rakennusprojektin lopussa, kun kaikki tarvittavat putket tai kaapelit on tuotu suoja-putken kautta ja asennettu lopullisesti.



Kuva 43. Merkittävimmät vuotokohdat (20 merkittävintä) kaikista vuototyypeistä.

Kuvassa 43 on esitetty kaksikymmentä merkittävintä yksittäistä vuotokohtaa. Ne on järjestetty suuruusjärjestykseen kohtalaisten ja suurien ilmavuotokohtien summana. Merkittävimmät kolme ovat oven tiivistevuoto säädön ollessa puutteellinen (0,02 suurta ja 0,10 kohtalaista vuotoa / kohde), oven tiivisteestä tarkemman syyn ollessa epäselvä (0,01 suurta ja 0,11 kohtalaista) sekä seinän ja alapohjan välinen tiivistys (0,01 suurta ja 0,11 kohtalaista). Merkittävin vuotokohta, eli puutteellinen oven säätö, on sellainen, että se usein korjataan

vielä asiakkaan tai timpurin toimesta paikan päällä ennen varsinaista tiiveysmittausta. Osa näistä jäisi todennäköisesti säätämättä ilman vuotokohtien paikannuksen tekemistä kohteissa. Höyrynsulkumuovissa olevat reiät pääsevät listalle sekä seinän että yläpohjan osalta. Oven tiiviste on myös kahdesti listalla, joista toisessa tapauksessa vika on selkeästi ollut puutteellisessa säädössä ja toisessa syy ei ole ollut selkeästi määritettävissä.

Vuotokohtien suuruusluokat olivat määritelty niin, että pieni vuoto tarkoittaa 4–20 m³/h, kohtalainen vuoto 20–60 m³/h ja suuri vuoto yli 60 m³/h, kun paine-ero on 50 pascalia. Suuruusluokkien aiheuttamat ilmamäärät ovat kuitenkin enemmän hypoteettisia kuin testattuja arvoja, joten vuotokohtien aiheuttamista keskimääräisistä ilmamäärästä tai energiankulutuksista voidaan laskea ainoastaan suuntaa-antavat arviot. Lasketaan esimerkiksi muutaman erilaisen vuotokohdan aiheuttama ilmamäärä, energiankulutus ja lämmityskustannus keskimääräisessä pientaloasunnossa. Minimiarviossa käytetään pienelle vuodolle 4 m³/h, kohtalaiselle 20 m³/h ja suurelle 60 m³/h. Vastaavasti maksimiarviossa käytetään pienelle vuodolle 20 m³/h, kohtalaiselle 60 m³/h ja suurelle 120 m³/h. Ilmamäärät ovat 50 pascalin paine-erolla, joten on sovellettava kaavaa (3), jotta voidaan laskea ilmamäärät normaalitilanteessa:

$$q_{v,vuotoilma} = \frac{q_{v,vuotoilma(50\text{ Pa})}}{3600 \cdot x} \quad (4)$$

$q_{v,vuotoilma(50\text{ Pa})}$	= rakennusvaipan ilmanvuotoluku (m ³ /m ² h)
x	= kerroin, joka on yksikerroksisille rakennuksille 35, kaksikerroksisille 24, kolmi- ja nelikerroksisille 20 ja viisikerroksisille tai korkeammille rakennuksille 15
3600	= kerroin, joka muuttaa ilmavirran m ³ /h yksiköstä m ³ /s yksikköön

(Ympäristöministeriö, 2012)

Taulukko 16. Ilmavuotokohtien aiheuttamat ilmavirrat, energiankulutus ja lämmityskustannukset

	Ilmamäärä 50 pascalissa (m ³ /h)	Ilmamäärä normaalissa käyttötilanteessa (l/s)	Energiankulutus vuodessa (kWh)	Lämmityskus- tannukset vuodessa (€)
Oven tiivisteestä ilmavuotoa. Oven säätö puutteellinen.	4,4–14,8	0,05–0,17	8–28	0,9–3,2
Kaikki oven tiivistevuodot (säätö puutteellinen, ovi käyrä tai syy ei tiedossa)	8,4–29,6	0,1–0,34	16–55	1,8–6,4
Kaikki oven vuotokohdat	15,2–54,9	0,18–0,64	29–103	3,3–11,8
20 merkittävintä vuotokohtaa	55,0–195,5	0,64–2,26	103–366	11,8–42,1
Kaikki kohtalaiset ja suuret vuotokohdat	47,6–126,9	0,55–1,47	89–238	10,3–27,4
Kaikki vuotokohdat	84,9–313,5	0,98–3,63	159–587	18,3–67,5

Taulukossa 16 on laskettu tyypillisten vuotokohtien ilmavirrat, energiankulutus ja lämmityskustannukset. Energiankulutus on laskettu kaavalla (2) käyttäen arvoina $x = 24$ (1,5-kerroksinen tai kaksikerroksinen), $\rho_i = 1,2 \text{ kg/m}^3$, $c_{pi} = 1000 \text{ Ws/kgK}$, $T_s = 21 \text{ °C}$, $T_u = 5,6 \text{ °C}$ (säävyöhyke I tai II keskimäärin), $\Delta t = 8760 \text{ h}$ (vuosi). Lisäksi vuoden energiankulutus on muutettu lämmityskustannuksiksi sähkön keskimääräisellä kuluttajahinnalla 0,115 €/kWh (Tilastokeskus, 2014). Laskenta on suuntaa antava, sillä se ei ota rakennusta kokonaisuutena huomioon (esimerkiksi seinän lämmöntalteenottoefektiä ei ole otettu huomioon). (Ympäristöministeriö, 2011)

Puutteellisen säädön aiheuttama oven tiivistevuoto kuluttaa energiana vuodessa keskimääräisessä pientaloasunnossa 8–28 kWh, kaikki oven tiivistevuodot (säätö puutteellinen, ovi käyrä tai syy ei varma) 16–55 kWh, kaikki oven vuotokohdat 29–103 kWh, 20 merkittävintä vuotokohtaa yhteensä 103–366 kWh, kaikki kohtalaiset ja suuret vuotokohdat yhteensä 89–238 kWh (tai 10–27 €) ja kaikki vuotokohdat yhteensä 159–587 kWh (tai 18,3–67,5 €). Aiemmin päädyttiin keskimääräisen ilmanvuotoluvun avulla laskelmaan, että vuotokohtien kautta

kuluu keskimäärin uudessa pientaloasunnossa 1010 kWh (tai 120 €) vuotokohtien kautta. Tällä perusteella löydetty vuotokohdat vastaisivat noin 16–58 % ilmanvuotoluvusta.

Kohtalaiset ja suuret vuotokohdat vastaavat laskelman mukaan 41–56 %, eli noin puolet, kaikkien löydettyjen vuotokohtien aiheuttamasta energiankulutuksesta. Niiden aiheuttama energiankulutus 89–238 kWh (tai 10–27 €) on merkittävä. Tämä kulutus jatkuu koko rakennuksen elinkaaren ajan, mikäli vuotokohtia ei korjata, joten vuosittainen kulu on vain pieni osa kokonaiskustannusta. Esimerkiksi kahdessakymmenessä vuodessa kulutus on jo 1780–4760 kWh (tai 200–540 €). Ne voisivat myös aiheuttaa jo aiemmin mainittuja kosteusteknisiä ongelmia, vetoisuutta ja esimerkiksi mikrobien, pölyn ja radonin pääsyä sisäilmaan sekä vetoisuutta. Kohtalaisia vuotoja on keskimäärin 1,6 kappaletta ja suuria 0,3 kappaletta eli yhteensä noin 2 kappaletta.

6. Pohdinta

Ensimmäisenä tutkimuskysymyksenä oli selvittää miten ilmatiiveys ja ilmavuotokohdat voidaan todentaa rakennuksessa. Ilmatiiveysmittaus tehdään painekoemenetelmällä, joka on esitetty standardissa SFS-EN 13829. Yleensä mittaus tehdään erillisellä oven paikalle asennettavalla laitteistolla, jossa puhallin paineistaa talon ja mittaa vuotoilmavirran. Vuotokohtien paikannukselle ei ole standardimenetelmää. Se voidaan tehdä ilmatiiveysmittauksen yhteydessä esimerkiksi lämpökamerakuvausella, käsin tunnustelulla, ilmavirtausmittauksilla, merkkisavukokeilla, merkkiainetutkimuksella tai akustisilla menetelmillä. Näistä yleisimmin käytetty on lämpökamerakuvaus. (Suomen Standardisoimisliitto SFS ry, 2001) (Paloniitty, 2012) (Ganesh Raman, 2014)

Toisena tutkimuskysymyksenä oli selvittää ilmatiiveyden nykyinen taso. Tässä keskityttiin etenkin uusiin pientaloihin ja verrattiin niitä aiempien tutkimusten avulla olemassa oleviin pientaloihin. Olemassa olevien pientalojen keskimääräisen ilmanvuotoluvun q_{50} todettiin olevan aiempien tutkimusten perusteella $3,7 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ (Vinha, 2009) (Vinha, 2005). Tässä tutkimuksessa tehtyjen mittausten perusteella uudispientaloasunnoille keskiarvoksi saatiin $1,4 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$. Uudispientalojen tulos on samaa luokkaa kuin vastaavissa tutkimuksissa (Paloniitty, 2012) (Rakennustutkimus RTS Oy, 2013) (Rakennustutkimus RTS Oy, 2014). Suurin virhetekijä uudispientalojen tuloksissa on se, ettei mittauksia ole valittu satunnaisotannalla, vaan ne perustuvat kaupallisiin tilauksiin. Otoksesta puuttuu siis kokonaan ne uudispientalot, joita ei mitata ollenkaan, ja mittauskohteet painottuvat myös paljon teolliseen rakentamiseen. Rakennustutkimus RTS Oy:n kyselytutkimuksesta havaittiin, että mitä teollisempaa rakentaminen on, sitä useammin ilmatiiveys mitataan ja saadaan parempia tuloksia (Rakennustutkimus RTS Oy, 2013) (Rakennustutkimus RTS Oy, 2014). Vuotokohtien paikannuksella löydettyjä vuotokohtia on myös asiakkaiden toimesta usein korjattu ennen ilmanvuotoluvun määrittämistä. Todellinen keskiarvo uudispientaloissa olisi siis todennäköisesti heikompi.

Pyrkimykset tiiviimpiin taloihin ovat johtaneet ja johtavat uudisrakentamisessa edelleen parempiin tuloksiin.

Mitatuista uudispienaloasunnoista 98 % alitti ilmanvuotoluvun $4,0 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$, jopa 83 % kohteista alitti myös arvon $2,0 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$, ja jopa 39 % alitti myös arvon $1,0 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$, jota voidaan pitää jo kiitettävänä tuloksena. Näitä tuloksia voidaan pitää Suomen rakentamisen laadun kannalta melko hyvinä tuloksina. Kuitenkin mitatuista kohteista kohtalaisen heikon tuloksen $2,0\text{--}4,0 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ sai 15 % asunnoista ja heikon tuloksen yli $4,0 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ sai 2 % asunnoista. Suomessa rakennettiin vuonna 2013 yhteensä 11 200 pientaloasuntoa (Rakennustutkimus RTS Oy, 2014). Vuosittain siis arviolta noin 1680 uudessa pientaloasunnossa on kohtalaisen heikko ja 220 pientaloasunnolla heikko ilmatiiveys. Jatkotutkimuksena olisi mielenkiintoista seurata sisäilmaston laatua, energiankulutusta ja rakenteiden toimivuutta verraten ilmatiiveydellisesti hyviä ja heikkoja kohteita.

Olemassa olevissa pientaloissa kivitalojen keskiarvo oli $2,5 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$, puutalojen $3,9 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ ja hirsitalojen $5,7 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ (Vinha, 2009) (Vinha, 2005). Uusissa pientaloissa vastaavasti kivitalojen ja puutalojen keskiarvot olivat kummankin $1,2 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ ja hirsitalojen $1,9 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$. Hirsitaloilla oli suurin hajonta tuloksissa. Etenkin hirsitalorakentajien keskuudessa on havaittu sellaista asennetta, ettei hirsitalon kuulukaan olla tiivis. Perinteisesti ajatellaan, että hirsitalon kuuluu ”hengittää” ilmaa saumoistaan. Hirren hengittävyydellä ei nykyään tarkoiteta enää hirsirakenteen saumojen ilmanläpäisyä, vaan hirsien kykyä sitoa ja luovuttaa kosteutta. Monelle hirsitalo valmistajalle yksi tärkein kehityskohta lieneekin asenteisiin vaikuttaminen, ja sitä on myös pyritty tekemään. Myös puutalojen rakentajissa ilmenee samanlaista asennetta, joskin se on hieman harvinaisempaa.

Aiemmissa tutkimuksissa on todettu ilmatiiveyden heikkenevän muutaman vuoden jälkeen rakentamisesta (Metiäinen, 1986). Kovin uutta tällaista tutkimusta ei ole kuitenkaan tehty, joten uusi tutkimus ilmatiiveyden pysyvyydestä olisikin paikallaan. Rakennusmateriaalit ja tiivistysratkaisut ovat kehittyneet merkittävästi

viime vuosikymmenen aikana. Esimerkiksi höyrynsulkuteippien pitkäaikaiskestävyys on parantunut merkittävästi ja rakenneratkaisut voivat olla sellaisia, ettei puun kuivumiskutistuminen pääse vaikuttamaan ilmatiiveyteen. Etenkin hirsitaloilla tiiveys voisi jopa parantua oleellisesti muutaman vuoden hirsien painumisen jälkeen.

Kolmantena tutkimuskysymyksenä oli selvittää mitä ilmavuotokohtia uusissa pientaloissa ilmenee. Tätä varten työssä kehitettiin ilmavuotokohtien paikannusta ja vuotokohtien tilastointia. Kehitystyön tärkeimmät ohjaavat kysymykset olivat:

1. Mistä tai miksi talot vuotavat?
2. Mihin pitäisi kiinnittää huomiota suunniteltaessa ja rakennettaessa uusia taloja tai korjattaessa vanhoja taloja?

Näitä kysymyksiä varten laadittiin vuotokohdille suuruusluokitus (neljä suuruusluokkaa) ja entistä laajempi tyyppiluokitus (82 vuototyyppiä). Lisäksi näiden keruuseen tehtiin tilastotietokanta, johon voidaan kerätä tietoa vuotokohdista ja ilmanvuotoluvuista ottaen huomioon rakennuksen taustatiedot, kuten rakennuksen tyyppi, ikä tai muut tekijät.

Uusi menetelmä ja tilasto toivat uutta tietoa uudispientalojen vuodoista. Muun muassa ikkunoiden vuodot todettiin vähemmän tärkeiksi, sillä niiden havaittiin olevan yleensä pieniä vuotoja. Aiemmista tutkimuksista puuttuikin suuruus- tai vakavuusluokittelu. Uudella menetelmällä pystyttiin myös tarkentamaan esimerkiksi tuleeko vuoto ikkunan tiivisteestä vai karmin ja seinän välistä. Myös esimerkiksi yläpohja-seinäliitosten vuotokohdat olivat aiemmissa tutkimuksissa yleisimpien vuotokohtien joukossa, mutta uudella menetelmällä pystyttiin todistamaan näiden olevan todellisuudessa harvinaisempia, ainakin uusissa pientaloissa (Vinha, 2009). Kehitetty menetelmä, luokittelu ja tilastointijärjestelmä ovat tietävästi ainutlaatuisia. Jatkossa sen avulla voidaan tutkia myös esimerkiksi kerrostalojen tai muiden rakennustyyppien ilmavuotoja sekä myös olemassa olevien rakennusten ilmavuotokohtia.

Suuruusluokille määriteltiin kuvaukset, joiden avulla ne voidaan erotella toisistaan. Jokaiselle suuruusluokalle määriteltiin myös esimerkkitapauksia. Lisäksi määriteltiin suuruusluokkien arvioidut vaikutukset vuotoilmavirtaan. Mitättömän vuodon arvioitu tai määritelty vaikutus vuotoilmavirtaan 50 pascalin paine-erolla on alle 4 m³/h, pienen 4–20 m³/h, kohtalaisen 20–60 m³/h ja suuren yli 60 m³/h. Näiden mittaaminen on kuitenkin työlästä, joten käytännössä määrittely tehdään kuvausten ja esimerkkien perusteella.

Eniten vuotoja löydettiin ikkunoista, mutta ikkunoiden vuodot ovat pääasiassa pieniä vuotoja. Kun lasketaan pelkät kohtalaiset ja suuret vuotokohtat, merkittävimiksi vuotokategorioiksi saatiin järjestyksessä ovet, sähköasennukset, yläpohja, ilmanvaihtotasennukset, alapohja, yläpohja-seinäliitokset ja seinässä olevat vuodot. Yksittäisistä vuotokohtista suurten ja kohtalaisten vuotojen perusteella merkittävimmät kymmenen vuotokohtaa ovat järjestyksessä:

- Oven tiivistevuoto säädön ollessa puutteellinen
- Oven tiivistevuoto (ilman tarkempaa syytä)
- Seinän ja alapohjan välinen tiivistys
- Seinän ja yläpohjan välinen tiivistys
- Yläpohjan höyrynsulkumuovin sauman teippaus
- Alapohjan suoja-putken kautta
- Sähköjohdon läpiviennin puuttuva tiivistys
- Ilmanvaihtokoneen yläpuolelta
- Hormin tiivistys yläpohjaan
- Oven karmin ja seinän välinen tiivistys

Yhteensä vuotoja havaittiin keskimäärin uudessa mitatussa pientaloasunnossa 11,2 kappaletta, joista suuria vuotoja oli 0,3 kappaletta, kohtalaisia 1,6 kappaletta ja pieniä 9,3 kappaletta.

Vuotokohtatutkimuksessa tuloksiin virhettä aiheuttavat todennäköisesti eniten mittaajien koulutuksen tai kokemuksen taso, suuruus- tai tyyppiluokituksen

tulkinnanvaraisuus ja siten luokittelun yhtenäisyys. Vuotokohtien havaitsemiseen vaikuttaa myös merkittävästi ulko- ja sisäilman lämpötilaero mittauksen aikana. Parhaimmillaan vuotokohtatutkimus voisi olla mahdollisimman objektiivinen ja yksiselkoinen menetelmä, jonka avulla voitaisiin ratkaista esimerkiksi reklamaatiotapauksia. Myös vuotokohtatutkimuksessa mitattuja kohteita ei valittu satunnaisotannalla, vaan ne edustavat vahvemmin teollista rakentamista, ja siten todennäköisesti ovat hieman parempia kuin uudispientalot todellisuudessa.

Vuotokohtatilastointia tulisi myös edelleen kehittää. Erilaisia rakenteita ei ole suhteutettu markkinaosuuksiinsa. Esimerkiksi hirsiseinien vuodot on jaettu kaikille mitatuille kohteille, eikä pelkästään hirsitaloille. Myös ilmansulkupaperi, höyrynsulkumuovi ja uretaanilevy voitaisiin ilmansulkuina ottaa erilleen taustatekijöiksi, jolloin voitaisiin todeta niiden toimivuus toisiinsa nähden. Toisaalta nämä kategoriat voitaisiin yhtä hyvin yhdistää yhdeksi tyyppiluokaksi, sillä tehty virhe on loppujen lopuksi sama, eikä eri ilmansulkumateriaalien vertaaminen tässä ollutkaan alun perin tutkimuksen tavoite. Myös muita vuototyyppejä voitaisiin lisätä tilastoon tai poistaa sieltä ja joitain vuototyyppejä voitaisiin yhdistellä yhdeksi. Nyt, kun tilastoa on kertynyt jo kohtalaisen paljon, olisi tämä mahdollista tehdä olemassa olevan tiedon pohjalta.

Vuotokohtien paikannuksessa käytettävä suuruusluokitus ei ole ihan yksiselitteinen. Käytännössä mittaus tapahtuu käsin tunnustelemalla, aina kuitenkin vakioidulla 50 pascalin paine-erolla. Käsin tunnustellen päätellään karkeasti vuotokohdan laajuus ja ilmavirran nopeus. Näitä olisi mahdollista mitata tarkemminkin. Esimerkiksi ilmavirtausmittarilla voitaisiin mitata nopeuden keskiarvoa muutaman minuutin aikana ja laajuus mitata metrimitalla. Toinen vaihtoehto olisi korjata vuotokohta ja mitata sen vaikutus kokonaisvuotoilmavirtaan, jonka laitteisto antaa jatkuvasti paikannuksen aikana. Näissä tulee kuitenkin vastaan käytännöllisyys, eli tarkempi määrittäminen veisi kohtalaisen paljon aikaa. Toistaiseksi näitä menetelmiä on testattu jonkin verran ja suuruusluokat perustuvatkin osittain tällaiseen pieneen testimäärään.

Vuotokohtatilastot on tällä hetkellä kerätty ennen vuotokohtien mahdollista korjaamista paikan päällä. Usein paikalla oleva asiakas tai kirvesmies korjaa vuotokohtia sitä mukaa kuin niitä löytyy. Tilastot on siis laadittu ennen näitä korjauksia, eli on ajateltu sitä mitä vuotokohtia rakennukseen jäisi ilman vuotokohtien paikannusta tai niiden korjausta. Tämän jälkeen ilmanvuotoluku mitataan pienten korjausten jälkeen. Siten tilastoidut vuotokohdat ja ilmanvuotoluku eivät vastaa toisiaan, eli niiden välille voi olla vaikeaa saada hyvää korrelaatiota. Niiden keskinäinen vastaavuus ei ole ollutkaan tavoitteena menetelmiä laatiessa, joskin hyvä korrelaatio osittain todistaisi vuotokohtien paikannuksen pätevyyden menetelmänä. Korrelaatiota olisi mahdollista tutkia, mikäli joko ilmanvuotoluku mitattaisiin myös ennen vuotokohtien korjausta tai vuotokohtiin tilastoitaisiin niiden korjaus, jolloin voitaisiin erotella havaitut vuotokohdat aluksi ja korjausten jälkeen. Samalla voitaisiin saada tietoa erilaisten vuotokohtien korjausten vaikutuksesta ilmanvuotolukuun.

Kokemuksen perusteella vuotokohtien sijainnilla on suuri merkitys siihen, miten asukas kokee ne. Esimerkiksi makuuhuoneessa tai työpisteellä sijaitsevat vuodot vaikuttavat olevan helpommin reklamaation kohteena vetoisuuden vuoksi. Tämän takia tilastoissa voisi olla järkevää huomioida myös missä huoneessa vuotokohta on havaittu.

Vuotokohtien paikannusmenetelmässä ja tilastoinnissa on siis paljonkin kehitettävissä. Se on kuitenkin nykyiselläänkin havaittu kohtalaisen hyväksi ja hyödylliseksi. Monet talotehtaat ja rakennusliikkeet käyttävät sitä jo nyt kehittääkseen omaa laatuaan ja välttääkseen myöhempiä reklamaatioita ja jälkikorjauksia. Vuotokohtien paikannus alipaineessa voisi olla järkevää tehdä jopa jokaiseen uuteen asuntoon. Tällä hetkellä lähes kaikki uudet kerrostaloasunnot lämpökuvataan normaalitilanteessa. Siinä havaittavat viat ovat tyypillisimmin juurikin ilmavuotokohtia. Normaalissa lämpökuvauksessa jopa suuretkin ilmavuodot voivat kuitenkin jäädä helposti havaitsematta, koska asunto tai sen osa, kuten yläpohja, on helposti ylipaineinen ulkoilmaan nähden tai alipaineisuus on liian pieni havaitsemisen kannalta.

Neljäntenä tutkimuskysymyksenä oli selvittää ilmavuotokohtien aiheuttama lämmitysenergian kulutus, kustannukset sekä mitä muuta ilmavuotokohtat voivat aiheuttaa. Olemassa oleville pientaloasunnoille laskettiin keskimääräisen energiankulutuksen ilmavuotojen kautta olevan 2660 kWh (tai 310 euroa sähkölämmityksellä) ja uusille pientaloasunnoille 1010 kWh (tai 120 euroa) vuodessa. Erotus 1650 kWh (tai 190 euroa) vuosittain on kohtalaisen merkittävä, kun otetaan huomioon koko rakennuksen elinkaari. On huomattava, että lämmityskustannus on laskettu sähkölämmityksellä. Esimerkiksi maalämmöllä lämmitettynä kustannusvaikutus on huomattavasti pienempi, jos vaan maalämpöpumpussa riittää tehoa kattamaan tämä ylimääräinen energiankulutus. Toisaalta maalämmöllä lämmitettynä investointikustannus aiheuttaa merkittävän osan lämmityksen elinkaarikustannuksista, ja hyvin tiiviissä talossa riittää pienempitehoinen ja edullisempi lämpöpumppu.

Laskettiin, että kaikki löydettyt kohtalaiset ja suuret vuodot aiheuttavat 89–238 kWh ja kaikki löydettyt vuotokohtat 159–587 kWh lämmitysenergian tarpeen. Sähköllä lämmitettynä kaikki löydettyt vuotokohtat aiheuttavat siis noin 18,3–67,5 € lämmityskustannuksen vuosittain. Kaikkien vuotokohtien kautta, eli muutkin kuin löydettyt vuodot, aiheutuu 1010 kWh lämmitysenergian tarve, eli löydettyt vuotokohtat vastaavat noin 16–58 % koko ilmanvuotoluvusta. Tämä kuulostaa melko realistiselta, sillä osa vuodoista ei ole niin pistemäisiä tai riittävän suuria, että niitä voitaisiin havaita lämpökameralla tai käsin tunnustellen.

Kohtalaiset ja suuret vuotokohtat vastaavat laskelmien mukaan noin puolta kaikkien löydettyjen vuotokohtien aiheuttamasta lämmitysenergian kulutuksesta. Esimerkiksi kahdessakymmenessä vuodessa niiden kulutus on jo 1780–4760 kWh, mikä vastaisi sähköllä lämmitettynä 200–540 €. Kohtalaisia vuotoja on keskimäärin 1,6 kappaletta ja suuria 0,3 kappaletta eli yhteensä noin 2 kappaletta. Ne on siis todennäköisesti järkeviä korjata, vaikka rakenteita jouduttaisiin hieman purkamaan korjausta varten. Usein asiakas tai rakennusmiehet pystyvätkin korjaamaan ne jo ennen varsinaista tiiveysmittausta. Nämä vuodot jäisivät myös helposti huomaamatta, mikäli vuotokohtien paikannusta ei tehtäisi tiiveysmittauksen yhteydessä.

Osa pienistä vuodoista sen sijaan ei välttämättä ole järkeviä korjata, mikäli niitä varten joudutaan purkamaan rakenteita tai vaihtamaan rakennusosia. Toisaalta osa pienistäkin vuodoista on niin helppo korjata, että niiden korjaus on varmasti järkevää ja kannattavaa. Helppoja korjattavia merkittävimpien vuotokohtien listalta ovat esimerkiksi:

- Oven säätäminen
- Höyrynsulun reikien ja avonaisten saumojen teippaus
- Alapohjan suojaputken tiivistys esimerkiksi uretaanivaahdolla
- Sähköjohdon läpiviennin puuttuvan tiivistyksen teippaus tai vaahdotus
- Hormin tiivistyksen teippaus tai muu tiivistys yläpohjaan (jos ei vielä levytetty)
- Oven tai ikkunan karmin ja seinän välinen tiivistys teippauksella tai uretaanivaahdolla
- Ilmanvaihtokanavan tai muun putken läpivientikauluksen asennus tai teippaus
- Alapohjan putkiläpiviennin tiivistyksen korjaus betonivalulla, uretaanivaahdolla tai tiivistysmassalla

Ylimääräisen energiankulutuksen lisäksi ilmavuotokohdat voivat aiheuttaa kosteusvaurioita kosteuden tiivistyessä rakenteisiin, vetoisuutta sekä muun muassa pölyn, mikrobien ja radonin pääsyä sisäilmaan. (Kalamees, 2006) (Paloniitty, 2012)

7. Yhteenveto

Ilmatiiveys on nykyaikaisessa energiatehokkaassa rakentamisessa tärkeää, koska ilmavuotokohdat aiheuttavat ylimääräistä energiankulutusta. Paksut eristeet ja ilmavuotokohdat aiheuttavat yhdessä entistä helpommin kosteuden tiivistymistä rakenteisiin. Vuotokohdat voivat aiheuttaa myös muun muassa vetoisuutta sekä pölyn, mikrobien ja radonin pääsyä sisäilmaan.

Ilmatiiveysmittaus tehdään painekoemenetelmällä, joka on esitetty standardissa SFS-EN 13829. Vuotokohtien paikannus voidaan tehdä ilmatiiveysmittauksen yhteydessä lämpökamerakuvausella, käsin tunnustelulla, ilmavirtausmittauksilla, merkkisavukokeilla, merkkiainetutkimuksella tai akustisilla menetelmillä.

Tässä diplomityössä käsiteltiin laajaa uutta kokeellista aineistoa, joka perustuu 898 uudispientaloasunnon tiiveysmittaukseen vuosilta 2012–2015. Lisäksi aiemmista tutkimuksista koottiin 170 olemassa olevan uudispientalon otos vertailua varten. Tuloksena saatiin uudispientalojen ilmanvuotoluvun q_{50} keskiarvoksi $1,4 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$. Vastaavasti selvitettiin olemassa olevien pientalojen ilmanvuotoluvun keskiarvon olevan $3,7 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$.

Työssä saatujen uusien tulosten perusteella uusissa pientaloissa kivitalojen ja puutalojen keskiarvot olivat kummankin $1,2 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ ja hirsitalojen $1,9 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$. Hirsitaloilla oli suurin hajonta tuloksissa. Järjestys on sama kuin olemassa olevissa pientaloissa aiempien tutkimusten perusteella, mutta tulokset ovat merkittävästi parempia. Ulkoseinärakenteen lisäksi tuloksiin vaikuttavat kerrosluku, rakennustyyppi. Havaittiin myös, että mitä teollisempaa rakentaminen on, sitä useammin ilmatiiveys mitataan ja saadaan parempia tuloksia.

Aiemmin käytetty vuotokohtien luokitus havaittiin puutteelliseksi. Se vastasi jossain määrin kysymykseen mistä vuotaa, muttei kysymykseen miksi vuotaa. Työssä kehitettiin vuotokohdille uusi luokittelumenetelmä, jossa vuodot luokitellaan vuototyyppin ja arvioidun suuruuden mukaan. Vuotokohdat jaettiin neljään suuruusluokkaan: mitätön, pieni, kohtalainen ja suuri. Suuruusluokille

määriteltiin kuvaukset miten ne voidaan erotella toisistaan. Jokaiselle suuruusluokalle määriteltiin myös esimerkitapauksia. Lisäksi määriteltiin suuruusluokkien arvioitua vaikutus vuotoilmavirtaan. Mitättömän vuodon arvioitu tai määritelty vaikutus vuotoilmavirtaan 50 pascalin paine-erolla on alle 4 m³/h, pienen 4–20 m³/h, kohtalaisen 20–60 m³/h ja suuren yli 60 m³/h. Näiden mittaaminen on kuitenkin työlästä, joten määrittely on tehty kuvausten ja esimerkkien perusteella. Uuteen tyyppiluokitukseen vuotokohtat luokiteltiin 82 erilaiseksi vuotokohdaksi, jotka jaettiin kahteentoista kategoriaan.

Vuotokohtien osalta tutkittujen uudispientaloasuntojen otos oli 372 kappaletta. Eniten vuotokohtia löydettiin ikkunoista, mutta ikkunoiden vuodot ovat pääasiassa pieniä vuotoja. Suurten ja kohtalaisten vuotojen perusteella merkittävimmiksi vuotokategorioiksi saatiin ovet, sähköasennukset, yläpohja, ilmanvaihtoasennukset, alapohja, yläpohja-seinäliitokset ja seinässä olevat vuodot. Yksittäisistä vuotokohdista suurten ja kohtalaisten vuotojen perusteella merkittävimmät viisi vuotokohtaa ovat järjestyksessä oven tiivistevuoto säädön ollessa puutteellinen, oven tiivistevuoto (ei tarkempaa syytä), seinän ja alapohjan välinen tiivistys, seinän ja yläpohjan välinen tiivistys sekä yläpohjan höyrynsulkumuovin sauman teippaus.

Yhteensä vuotoja havaittiin keskimäärin uudessa pientaloasunnossa 11,2 kappaletta, joista suuria vuotoja oli 0,3 kappaletta, kohtalaisia 1,6 kappaletta ja pieniä 9,3 kappaletta. Vuotokohtien tarkemmasta tuntemuksesta on hyötyä käytännön suunnitteluun ja tuotekehitykseen.

Vuotokohtien laskennallinen vaikutus energiankulutukseen on olemassa olevissa pientaloasunnoissa keskimäärin 2660 kWh ja uusissa pientaloasunnoissa 1010 kWh vuodessa. Löydettyjen vuotokohtien laskennallinen vaikutus on vuosittain 159–587 kWh lämmitysenergiankulutuksen uudessa pientaloasunnossa. Tästä kohtalaiset ja suuret vuodot aiheuttavat 41–56 %. Löydetty vuotokohtat vastaavat noin 16–58 % kaikista ilmapuodoista.

Lähdeluettelo

- Aho, H., Korpi, M. 2009. Ilmanpitävien rakenteiden ja liitosten toteutus asuinrakennuksissa, Raportti 141. Tampere. Tampereen Teknillinen Yliopisto, Rakennustekniikan laitos, Rakennetekniikka.
- APEX Energy Management Solutions. 2014. <http://www.apexsustainability.com>. Saatavilla <http://www.apexsustainability.com/wp-content/uploads/2011/05/smoke-test.jpg>. Viitattu 30.11.2014.
- Ganesh, R., Manisha, P., Rakesh R., Hirenkumar P., Kanthasamy C. 2014. Remote detection of building air infiltration using a compact microphone array and advanced beamforming methods. Chicago/Berliini. Berlin Beamforming Conference.
- Hintikka, T., 2014. Tiiviysmittaukset sisäilmastoteknisessä selvitystyössä. Helsinki. Sisäilmastoseminaari 2014.
- Immonen, M. 2008. Paine-eron vaikutus ilmavuotokohdan ympäristön pintalämpötilaan. Helsinki. Stadia, Helsingin Ammattikorkeakoulu.
- Kalamees, T. 2006. Air tightness and air leakages of new lightweight single-family detached houses in Estonia. Tallinn. Elsevier Ltd.
- Leivo, V. 2003. Tutkimusraportti 126, Hirsirakennuksen yläpohjan tiiviys - vaikutus lämpöenergiankulutukseen. Tampere. Tampereen Teknillinen yliopisto.
- Metiäinen, P., Saarimaa, J., Saarnio, P., Salomaa, H., Tulla, K., Viitanen, H. 1986. Rakennusten ilmanpitävyyden pysyvyys. Espoo. Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT).
- MIP Electronics Oy. 2014. www.mip.fi. Saatavilla <http://www.mip.fi/cms/fi/mittalaitteet/melu-ja-aeaeni/akustinen-kamera>. Viitattu 6.7.2014.
- Paloniitty, S. 2012. Rakennusten tiiviysmittaus. Helsinki. Suomen Rakennusmedia Oy.

Pietiko Oy. 2014. www.pietiko.fi. Saatavilla
http://www.pietiko.fi/www/product_info.php?cPath=&products_id=6202&osCsid=5cc03c95408468e8549ea919991b4f92. Viitattu 9.8.2014.

Rakennusteollisuus RT ry. 2005. Ratu 1213-S Rakennuksen lämpökuvaus. Rakennustieto Oy.

Rakennustieto Oy. 2009. RT 07-10946. Sisäilmastoluokitus 2008. Sisäilmaston tavoitearvot, suunnitteluohjeet ja tuotevaatimukset.

Rakennustietosäätiö RTS ja LVI-Keskusliitto ry. 2007. LVI 05-10417. Rakennusten sisäilmaston suunnitteluperusteet. Rakennustieto Oy.

Rakennustietosäätiö RTS. 2009. RT 80-10974 Teollisesti valmistettujen asuinrakennusten ilmanpitävyyden laadunvarmistusohje. Rakennustieto Oy.

Rakennustutkimus RTS Oy. 2012. Suomi Asuu 2012, Helsinki.

Saari, M., Antson, A., Kukkonen, P., Nyman, M. 2014. Energiatavokkaan pientalon ilmanvaihto-opas. Espoo. VTT Expert Services Oy.

Saurama, S. 2013. [www.audiovideo.fi](http://audiovideo.fi). Saatavilla
<http://audiovideo.fi/testi/norsonic-nor848-10-akustinen-kamera-testissa>. Viitattu 6.7. 2014.

Sirén, K. 1995. Ilmastointitekniikan mittaukset. Helsinki. Tietonova Oy.

Sosiaali- ja terveysministeriö. 2003. Asumisterveysohje. Helsinki.

Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 1989. SFS 5511. Ilmastointi. Rakennusten sisäilmasto. Lämpöolojen kenttämittaukset.

Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 2001. SFS-EN 13185. Rikkomaton aineenkoetus. Vuototestaus. Jälkikaasumenetelmä. Helsinki.

Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 2001. SFS-EN 13829. Helsinki.

Säteilyturvakeskus STUK. 2014. www.stuk.fi. Saatavilla http://www.stuk.fi/sateily-ymparistossa/radon/uudisrakentaminen/fi_FI/uudisrakentaminen/. Viitattu 13.12.2014.

Trotec, 2014. www.trotec24.com. Saatavilla <http://www.trotec24.com/fi-mittauslaitteet/ilmavirta/tuulimittari-ta-300-suora-sondi-sis-kalibr-sertifikaatin.html>. Viitattu 6.7.2014.

Vinha, J., Minna K., Kalamees, T., Jokisalo, J. Eskola, L., Palonen, J., Kurnitski, J., Aho, H., Salminen, M., Salminen, K., Keto, M. 2009. Asuinrakennusten ilmanpitävyys, sisäilmasto ja energiatalous. Tampere. Tampereen Teknillinen Yliopisto, Rakennustekniikan laitos.

Vinha, J., Minna K., Kalamees, T., Eskola, L., Palonen, J., Kurnitski, J., Valovirta, I., Mikkilä, A., Jokisalo, J. 2005. Puurunkoisten pientalojen kosteus- ja lämpötilaolosuhteet, ilmanvaihto ja ilmatiiviys. Tampere. Tampereen Teknillinen Yliopisto, Rakennustekniikan osasto.

Ympäristöministeriö. 2011. D2 Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto. Helsinki.

Ympäristöministeriö. 2011. D3 Suomen rakentamismääräyskokoelma, Rakennusten energiatehokkuus, Määräykset ja ohjeet 2012. Helsinki.

Ympäristöministeriö. 2012. D5 Suomen rakentamismääräyskokoelma, Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta. Helsinki.